

ANNEE 2021 THESE : 2021 – TOU 3 – 4017

---

# ETUDE DU RESEAU DE TRANSPORT DE PALMPIEDES A FOIE GRAS DANS LE SUD-OUEST ET DU ROLE JOUE PAR LES MOUVEMENTS DE VEHICULES DE TRANSPORT DANS LA DISSEMINATION DU VIRUS DE L'INFLUENZA AVIAIRE

---

THESE  
pour obtenir le titre de  
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement  
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

*par*

**SICARD Gabriel**  
Né le 15/04/1996 à LIMOGES (87)

**Directeur de thèse : M. Timothée VERGNE**

---

## JURY

PRESIDENT :  
**M. Jean-Luc GUERIN**

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

ASSESSEURS :  
**M. Timothée VERGNE**  
**Mme Mathilde PAUL**

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE  
Professeure à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

MEMBRES INVITES :  
**M. Billy BAUZILE**  
**Mme Claire GUINAT**

Chercheur, EPIDEC  
Chercheuse, EPIDEC



**Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation  
ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE**

**Directeur** : Professeur Pierre SANS

**PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE**

- M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
- M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Pharmacologie – Thérapeutique*
- M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des aliments d'Origine animale*
- Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la Reproduction*
- Mme **CLAUW Martine**, *Pharmacie-Toxicologie*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie Pathologique*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
- Mme **HAGEN-PICARD, Nicole**, *Pathologie de la reproduction*
- M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **PETIT Claude**, (Emérite) - *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **SCHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*
- Mme **TRUMEL Catherine**, *Biologie Médicale Animale et Comparée*

**PROFESSEURS 1° CLASSE**

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des aliments*
- Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- Mme **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie Vétérinaire*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootéchnie*
- M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Aviculture et pathologie aviaire*
- M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- Mme **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique, animaux d'élevage*
- Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*

**PROFESSEURS 2° CLASSE**

- Mme **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
- Mme **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mme **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation animale*
- M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*
- Mme **PAUL Mathilde**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles*
- M. **RABOISSON Didier**, *Médecine de population et Économie de la santé animale*

**PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE**

- Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
- M. **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

### **MAITRES DE CONFERENCE HORS CLASSE**

- M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*  
Mme **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*  
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*  
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*  
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*  
Mme **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*  
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*  
M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie*

### **MAITRES DE CONFERENCE (classe normale)**

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*  
Mme **BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*  
Mme **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*  
Mme **BOUHSIRA Emilie**, *Parasitologie, maladies parasitaires*  
M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*  
M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*  
Mme **DANIELS Hélène**, *Immunologie- Bactériologie-Pathologie infectieuse*  
Mme **DAVID Laure**, *Hygiène et Industrie des aliments*  
Mme **DEVIERS Alexandra**, *Anatomie-Imagerie*  
M. **DIDIMO IMAZAKI Pedro**, *Hygiène et Industrie des aliments*  
M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophtalmologie vétérinaire et comparée*  
Mme **FERRAN Aude**, *Physiologie*  
Mme **GRANAT Fanny**, *Biologie médicale animale*  
Mme **JOURDAN Géraldine**, *Anesthésie - Analgésie*  
Mme **LALLEMAND Elodie**, *Chirurgie des Equidés*  
Mme **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*  
M. **LE LOC'H Guillaume**, *Médecine zoologique et santé de la faune sauvage*  
M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*  
Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*  
Mme **MILA Hanna**, *Elevage des carnivores domestiques*  
M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*  
M. **VERGNE Timothée**, *Santé publique vétérinaire – Maladies animales réglementées*  
Mme **WARET-SZKUTA Agnès**, *Production et pathologie porcine*

### **CHARGES D'ENSEIGNEMENT CONTRACTUELS**

- M. **FERCHIOU Ahmed**, *Economie, production animale*,  
M. **LEYNAUD Vincent**, *Médecine interne*  
Mme **ROBIN Marie-Claire**, *Ophtalmologie*  
Mme **SOUVESTRE Marie**, *Production et pathologie aviaire*  
Mme **TOUSSAIN Marion**, *Pathologie des équidés*

### **ENSEIGNANT DE PREMIERE ANNEE COMMUNE AUX ETUDES**

- Mme **GAUCHARD Cécile**, *Biologie-écologie-santé*

### **ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE**

- M **BESSIERE Pierre**, *Microbiologie infectiologie*  
Mme **BLONDEL Margaux**, *Chirurgie des animaux de compagnie*  
M. **CARTIAUX Benjamin**, *Anatomie-Imagerie médicale*  
M. **COMBARROS-GARCIA Daniel**, *Dermatologie vétérinaire*  
M. **GAIDE Nicolas**, *Histologie, Anatomie Pathologique*  
M. **JOUSSERAND Nicolas**, *Médecine interne des animaux de compagnie*  
M. **LESUEUR Jérémy**, *Gestion de la santé des ruminants – Médecine collective de précision*  
M. **TOUITOU Florian**, *Alimentation animale*

# **Remerciements**

**A Monsieur le Professeur Jean-Luc GUÉRIN,**

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,

Aviculture et pathologie aviaire,

Qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse.

Hommages respectueux.

**A Monsieur le Professeur Timothée VERGNE,**

Maitre de conférence à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,

Santé publique vétérinaire – Maladies animales règlementées,

Pour son aide, son encadrement et sa disponibilité tout au long de cette thèse.

Sincères remerciements.

**A Madame le Docteur Mathilde PAUL,**

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,

Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles,

Qui nous a fait l'honneur de participer à ce jury de thèse.

Hommages respectueux.

**A Monsieur Billy Bauzile et Madame le Docteur Claire Guinat,**

Chercheurs au sein d'EPIDEC,

Pour leur aide et leurs conseils dans le cadre de ce projet.

Sincères remerciements.

**A Messieurs les directeurs des compagnies de transport de palmipèdes,**

Pour avoir accepté de fournir leurs données de transport.

Remerciements.



# Table des matières

<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>7</b>
<b>TABLE DES ANNEXES .....</b>	<b>9</b>
<b>TABLE DES FIGURES.....</b>	<b>10</b>
<b>TABLE DES TABLEAUX .....</b>	<b>12</b>
<b>TABLE DES ABREVIATIONS.....</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>14</b>
1) Contexte épidémiologique .....	14
2) Concernant l'influenza aviaire.....	17
3) Concernant la filière avicole palmipède à foie gras.....	18
4) De l'importance de comprendre les voies de transmission .....	19
<b>MATERIEL ET METHODES.....</b>	<b>22</b>
1) Modélisation du réseau .....	22
A) Les tournées.....	22
B) Les réseaux de contact.....	23
2) Création des bases de données.....	24
A) Matériel de base.....	24
B) Transformation et création des données .....	24
i) La base éleveur .....	24
ii) La base tournée .....	25
iii) Les bases Animal Introduction Network, Transit Network et Transit Network spécifique .....	25
3) Analyses des réseaux .....	25
A) Etude descriptive des compagnies .....	25
B) Etude de l'évolution temporelle de l'activité des compagnies .....	26
C) Etude de l'impact des mouvements de véhicules sur la dissémination du virus .....	26
i) Test statistique.....	26
ii) Calcul d'indices .....	27

<b>RESULTATS .....</b>	<b>32</b>
1) Analyses descriptives.....	32
2) Evolutions mensuelles .....	36
A) Evolution mensuelle du nombre de tournée .....	36
B) Evolution mensuelle du nombre moyen de PAG et de GAV visités par tournée.....	37
C) Evolution mensuelle des distances de tournée et du nombre moyen de départements visités par tournée .....	38
D) Evolution mensuelle du nombre de véhicules différents utilisés.....	40
3) Contribution des mouvements de véhicules à l'épizootie .....	41
A) Test statistique .....	41
B) Description des connexions à risque.....	42
C) Calculs d'indice .....	43
<b>DISCUSSION .....</b>	<b>45</b>
1) Analyses descriptives et quantitatives .....	45
2) Evolutions mensuelles .....	46
A) Période épizootique .....	46
B) En dehors de l'épizootie .....	46
3) Contribution des mouvements de véhicule à l'épizootie.....	47
A) Test statistique.....	48
B) Description des connexions à risque .....	49
C) Calculs d'indice .....	51
4) Limites de l'étude .....	52
A) Le manque de données.....	52
B) La fenêtre d'intervalle pour la définition d'une connexion à risque.....	54
C) Interaction avec d'autres voies de transmission .....	54
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>55</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>58</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>64</b>



## Table des annexes

<b>Annexe 1</b> - Exemple des structures de base.....	64
1) La base éleveur .....	64
2) La base tournée.....	65
3) Les bases AIN, TN et TNs .....	66
<b>Annexe 2</b> - Ensemble des distributions du nombre de connexions à risque pour les réseaux aléatoirement générés, pour l'ensemble des variables testées (k-test) .....	68
<b>Annexe 3</b> - Ensemble des comparaisons du nombre de transferts d'animaux recensés chaque mois entre les bases transporteurs et le CIFOG .....	74
1) Comparaison globale .....	75
2) Comparaison par organismes de production .....	76
3) Comparaison par départements .....	78

## Table des Figures

Figure 1 : Carte des foyers et de cas d'IAHP H5N5, H5N6 et H5N8 déclarés en Europe entre le 26 octobre 2016 et le 28 mai 2017 .....	14
Figure 2 : Répartition géographique des foyers d'IAHP H5N8 en élevage en France en 2016-2017 .....	15
Figure 3 : Chronologie des principales mesures mises en place entre le 16 novembre 2016 et le 29 mai 2017 .....	17
Figure 4 : Schéma de la filière palmipède à foie gras .....	18
Figure 5 : Exemple type du déroulé d'une tournée .....	22
Figure 6 : Transit Network, Animal Introduction Network et Transit Network spécifique d'une tournée de type PAG -> GAV1 -> GAV2.....	24
Figure 7 : Schéma illustrant un réseau fictif de mouvements de véhicules pendant une épizootie .....	27
Figure 8 : Schéma illustrant la proportion des mouvements totaux durant l'épizootie ayant pu propager le virus.....	28
Figure 9 : Schéma illustrant la proportion des foyers pour lesquels le mouvement de véhicule peut être imputable pour l'entrée du virus dans l'élevage.....	29
Figure 10 : Schéma illustrant le risque de transmettre le virus par les mouvements de véhicules depuis un foyer.....	30
Figure 11 : Schéma illustrant le risque de propager le virus à chaque mouvement de véhicule depuis un foyer .....	31
Figure 12 : Répartition départementale des élevages impliqués dans au moins une tournée pour chaque compagnie.....	32
Figure 13 : Répartition communale des élevages impliqués dans au moins 1 tournée pour chaque compagnie .....	33
Figure 14 : Distribution des types de tournée pour chaque compagnie .....	34
Figure 15 : Distribution du nombre de départements visités par tournée pour chaque compagnie .....	35
Figure 16 : Distribution de la distance moyenne des tournées pour chaque compagnie.....	35

Figure 17 : Evolution mensuelle du nombre de tournées réalisées par chaque compagnie .....	36
Figure 18 : Evolution mensuelle du nombre moyen de PAG et de GAV par tournée pour chaque compagnie .....	37
Figure 19 : Evolution mensuelle des distances de tournée pour chaque compagnie .....	39
Figure 20 : Evolution mensuelle du nombre moyen de départements visités par tournée pour chaque compagnie .....	39
Figure 21 : Evolution mensuelle du nombre de véhicules différents utilisés pour chaque compagnies.....	40
Figure 22 : Distribution spatio-temporelle des connexions à risque .....	43
Figure 23 : Localisation géographique des clusters les plus probables détectés par le test de permutation des données spatio-temporelles .....	50

## Table des Tableaux

Table 1 : Principales voies d'introduction du virus influenza aviaire en élevage pendant l'épizootie de 2016-2017 .....	20
Table 2 : Description numérique des deux compagnies .....	32
Table 3 : Résumé des valeurs calculées via le k-test .....	41
Table 4 : Liste des connexions à risques .....	42
Table 5 : Quantification du rôle potentiel joué par les mouvements de véhicules.....	44

## **Table des abréviations**

**AIN** : Animal introduction network

**CAR** : Connexion à risque

**CIFOG** : Comité interprofessionnel des palmipèdes à foie gras

**DGAI** : Direction générale de l'alimentation

**EPIDEC** : Épidémiologie et économie de la santé animale

**GAV** : Élevage pratiquant le gavage de palmipèdes

**IA** : Influenza aviaire

**IAFP** : Influenza aviaire faiblement pathogène

**IAHP** : Influenza aviaire hautement pathogène

**PAG** : Élevage produisant des palmipèdes prêt-à-gaver

**TN** : Transit network

**TNs** : Transit network spécifique

**ZP** : Zone de protection

**ZS** : Zone de surveillance

# Introduction

## 1) Contexte épidémiologique

Au cours de l'hiver 2016-2017, une sévère épizootie d'influenza aviaire hautement pathogène (IAHP) du sous-type H5N8 a touché la France. Introduite en Europe par les oiseaux migrateurs, elle s'est diffusée rapidement de l'est vers l'ouest (Cauchard et al. 2017). Elle a fortement touché les pays d'Europe centrale et du nord (Hongrie, Slovaquie, Allemagne, Danemark), provoquant des cas à la fois dans l'avifaune sauvage locale et dans les élevages de volaille (Alarcon et al. 2018 ; Cauchard et al. 2017). La distribution des foyers et cas détectés en Europe apparaît en Figure 1.

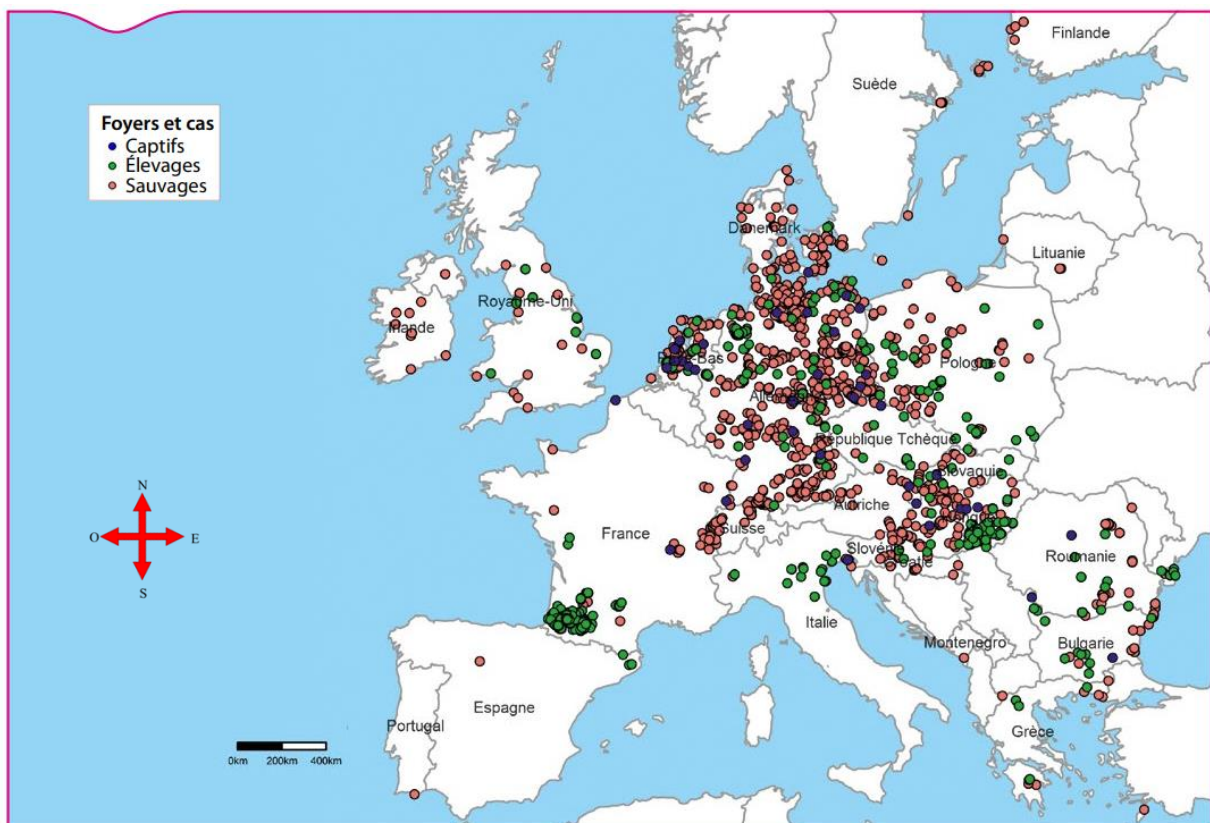


Figure 1 : Carte des foyers et de cas d'IAHP H5N5, H5N6 et H5N8 déclarés en Europe entre le 26 octobre 2016 et le 28 mai 2017 (Cauchard et al. 2017)

En France, cette épizootie a principalement sévi dans les régions du Sud-Ouest (Nouvelle-Aquitaine et Occitanie) et n'a touché quasiment que les élevages (peu de cas dans l'avifaune sauvage ont été recensés). Au total 484 élevages ont été déclarés foyers, dont environ 80 %

d'élevage de palmipèdes de la filière canard gras. La majorité des foyers avait une activité en plein-air (76% des foyers) ou détenait au moins une salle de gavage (62% des foyers) (Bronner et al. 2017). La distribution des foyers en élevage en France apparaît en Figure 2.

Des études ont démontré que deux dynamiques de propagation ont coexisté pendant cette épizootie, à l'échelle continentale et à une échelle locale (Napp et al. 2018). A l'échelle continentale, le virus semble avoir été diffusé via l'avifaune sauvage, sur de longues distances. Cette diffusion a été relayée à l'échelle locale par des contacts sur de plus courtes distances entre élevages. Ainsi, les pays les plus forts producteurs en palmipède gras (France et Hongrie) sont ceux enregistrant les plus grands nombres d'élevages atteints, du fait de leur maillage territorial dense.

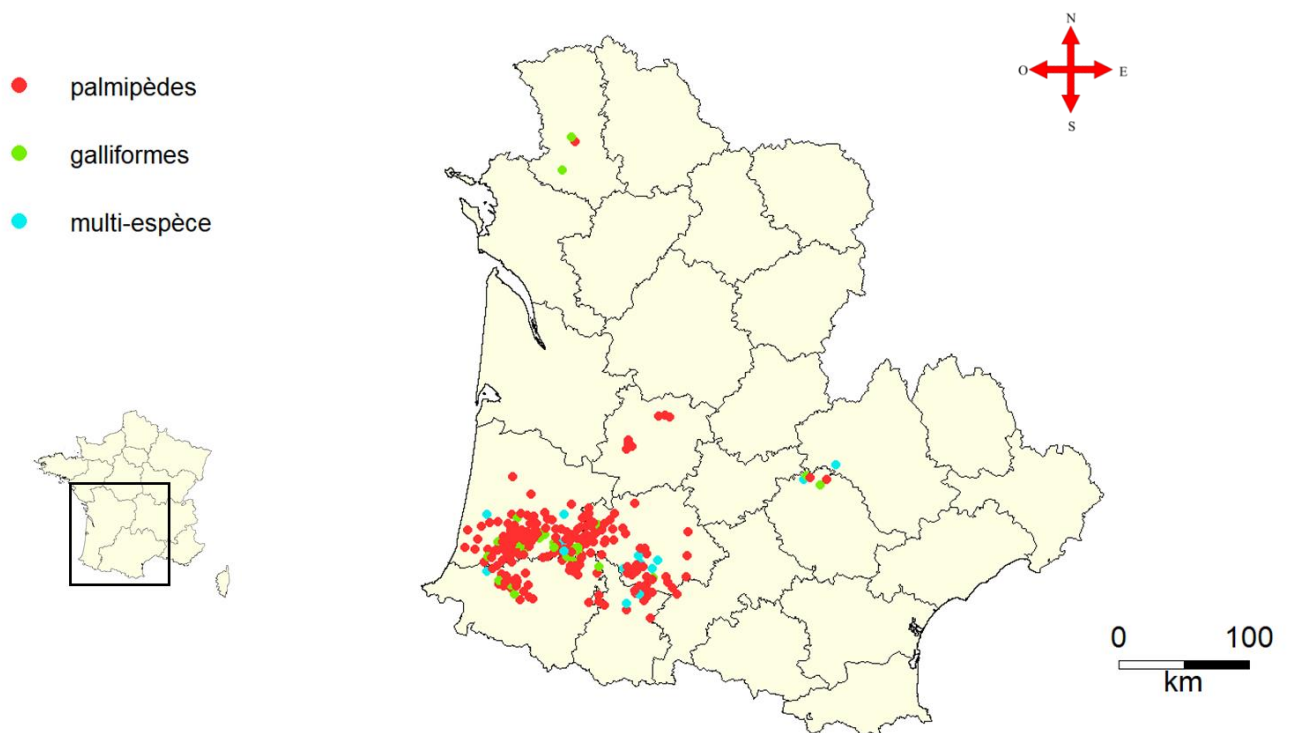


Figure 2 : Répartition géographique des foyers d'IAHP H5N8 en élevage en France en 2016-2017

De nombreuses mesures ont été mises en place pendant l'épizootie pour limiter la propagation du virus : de manière systématique, dès le début de l'épizootie et dès la découverte d'un cas en élevage, un dépeuplement et un assainissement du foyer était effectué, une zone de protection (ZP) dans un rayon de 3 km (recensement, dépistage, interdiction de déplacement...) et une zone de surveillance (ZS) dans un rayon de 10 km étaient mises en place, en accord avec la réglementation française (DGA1 2017). A partir du 4 janvier 2017, des mesures d'abattage préventif ont été prises face à l'impossibilité d'arrêter la propagation du virus avec les simples mesures systématiques. En cas de découverte d'un foyer, tous les élevages prêt-à-gaver dans les 3 km environnant (ou 10 km si plusieurs foyers) faisaient l'objet d'un abattage total. Ce n'est que par la mise-en-place de cet abattage préventif massif, de plus de 3 millions d'animaux, que l'épizootie a pu finalement être contenue, le dernier foyer déclaré remontant au 23 mars 2017, soit 16 semaines après le premier cas détecté (Bronner et al. 2017 ; DGA1 2017). La chronologie de ces événements est détaillée en Figure 3.

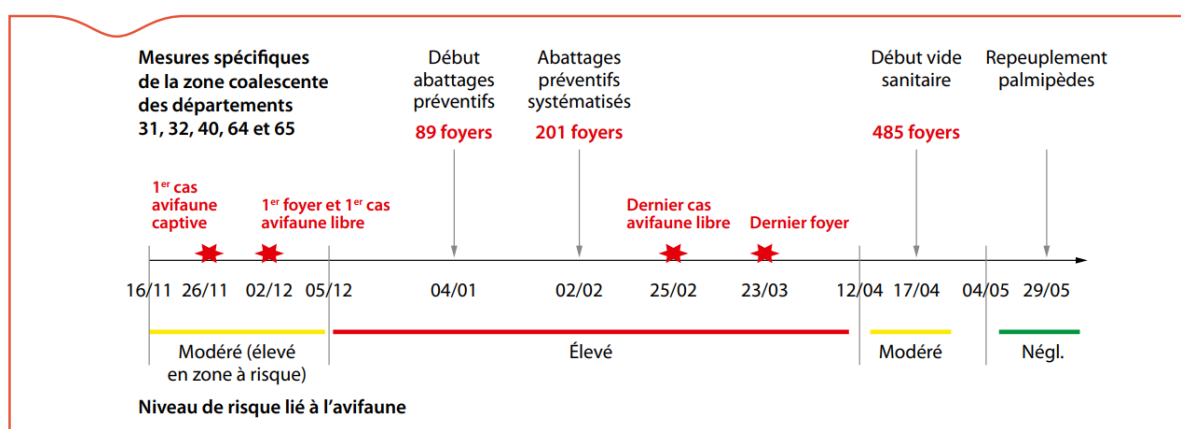


Figure 3 : Chronologie des principales mesures mises en place entre le 16 novembre 2016 et le 29 mai 2017 (Bronner et al. 2017)

Les pertes économiques engendrées par cet épisode s'élèvent à plusieurs centaines de millions d'euros (Hercule et Lalaurette 2019), du fait des indemnisations faites aux éleveurs, du coût de mise en place de toutes les mesures d'urgences (abattage massif, dépistages...), de l'arrêt des exportations et de la paralysie de l'ensemble de la filière (producteurs, transporteurs, commerçants...) entraînant une baisse nette de production pendant sept mois, l'activité n'ayant



pu reprendre qu'en mai 2017 après un vide-sanitaire général (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt 2017).

## **2) Concernant l'influenza aviaire**

La maladie de l'influenza aviaire est due à un virus de la famille des *Orthomyxoviridae*. Ces virus sont classés en sous-types selon 2 protéines de surface, l'hémagglutinine (HA) et la neuraminidase (NA), qui donnent leur dénomination (exemple : H5N8). Il existe également deux catégories pour regrouper les différentes souches de ce virus : les souches faiblement pathogènes (IAFP) et les souches hautement pathogènes (IAHP), ces-dernières ne contenant jusqu'à aujourd'hui que des sous-types H5 ou H7 (Spickler 2016).

Les protéines de surface du virus ont une grande capacité de variabilité : il n'est donc pas rare de voir apparaître par mutation ou réassortiment génétique de nouvelles souches chaque année, auxquelles les animaux n'ont jusqu'alors jamais été confrontés (Webster et al. 1992).

Le virus est excrété dans les fientes et les sécrétions respiratoires : les animaux peuvent ainsi se contaminer entre eux par contact direct. Le virus est aussi assez résistant dans le milieu extérieur, à des températures basses (Stallknecht et Brown 2009 ; Wood et al. 2010); il peut donc facilement être propagé d'un élevage à un autre par des vecteurs indirects : personnes, véhicules, équipements agricoles... (Swayne 2008b). Les oiseaux sauvages ont un rôle de réservoir pour ce virus, en particulier l'avifaune aquatique, et sont très souvent à l'origine des épizooties ravageant les élevages, par introduction d'une nouvelle souche (Olsen et al. 2006; Webster et al. 1992).

Dans sa forme hautement pathogène, la maladie se caractérise en élevage par des animaux prostrés ayant des signes respiratoires (toux, éternuements, sinusites...), de la diarrhée et des signes nerveux, par une chute de la production d'œuf et par une mortalité importante et rapide (elle peut avoisiner les 100 % en 48 heures) (Spickler 2016).

La maladie possède aussi un potentiel zoonotique, c'est-à-dire qu'elle peut être transmise à l'homme, bien qu'elle provoque rarement des symptômes, et encore plus rarement des formes graves (Spickler 2016).

Les souches hautement pathogènes, par leur effet destructeur sur les oiseaux et leur production, et par leur potentiel zoonotique, sont des maladies réglementées soumises à déclaration (dangers sanitaires de 1<sup>e</sup> catégorie).

### 3) Concernant la filière avicole palmipède à foie gras

Trois espèces sont utilisées dans la production de palmipède gras : les oies (*Anser anser*), les canards de barbarie (*Cairina moschata*) et les canards mulards, hybride entre un canard de barbarie et une cane de Pékin (*Anas platyrhynchos*) (Vuillaume et Banon 1988). Cependant la production de canard est très largement majoritaire (Direction Régionale de l’Alimentation, de l’Agriculture et de la Forêt Nouvelle-Aquitaine 2017).

Cette production se fait au travers d’une suite d’ateliers bien définis. Les canetons éclosent dans un couvoir. Ils sont ensuite envoyés à l’âge d’un jour dans un atelier de démarrage, en bâtiment clos, où ils restent environ quatre semaines, avant de passer dans un atelier de croissance (alimentation à volonté) - finition (restriction alimentaire) qui durera huit à dix semaine, atelier avec un accès en extérieur. A l’issue de cette étape de finition, on obtient des canards dits « prêts-à-gaver » (c’est pourquoi cet atelier sera référé par la suite comme atelier de prêt-à-gaver ou PAG). Ces canards sont enfin envoyés dans un atelier de gavage (GAV), à l’âge de 12 ou 14 semaines, où ils resteront 10 à 14 jours avant d’être envoyés en abattoir (Direction Régionale de l’Alimentation, de l’Agriculture et de la Forêt Nouvelle-Aquitaine 2017 ; ENITA 1993; Pingel et al. 2012). Cette filière est schématisée en Figure 4.

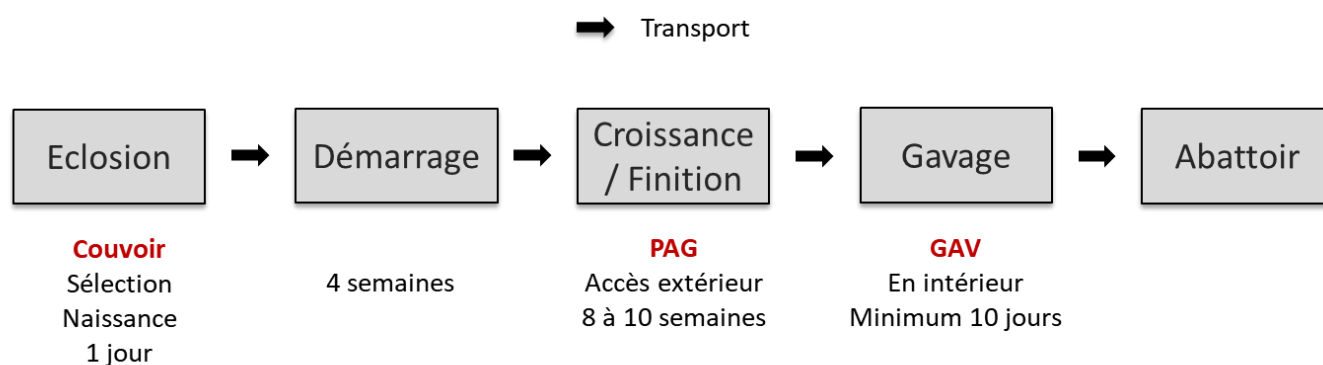


Figure 4 : Schéma de la filière palmipède à foie gras. *PAG : élevage prêt à gaver ; GAV : élevage de gavage*

Les ateliers démarrage-croissance se font la plupart du temps dans le même élevage, alors que le gavage est souvent réalisé dans un autre élevage, même si certains ont une activité mixte (PAG et GAV). A chaque changement d'atelier, les canards sont transportés dans des véhicules adaptés. Le passage d'un atelier PAG à un atelier GAV semble notamment être le plus à risque, car les animaux en atelier PAG sont plus exposés à la transmission du virus par la faune sauvage, le vent ou le voisinage du fait de l'accès en extérieur.

Les transferts d'animaux entre atelier PAG et GAV se font sous forme de tournées : de façon générale, le camion charge plusieurs milliers de canards à un PAG et dépose son chargement dans un ou plusieurs GAV, qui sont des ateliers de taille plus réduite. Un seul camion peut donc visiter plusieurs élevages différents dans la même journée, et donc contribuer potentiellement à la diffusion du virus.

#### **4) De l'importance de comprendre les voies de transmission**

Le patron de propagation du virus Influenza au cours de cette épizootie, en France, est encore mal connu. Il semblerait que le virus se soit propagé à partir du premier foyer via les mouvements d'animaux (Guinat et al. 2020). Il s'est ensuite principalement propagé entre élevages voisins (moins de 10 km), suggérant un rôle important des contacts directs ou du vent comme voie de transmission. Puis dans un second temps (à partir de février 2017), les contaminations se sont faites principalement entre élevage distants (plus de 10 km), suggérant plutôt un rôle des mouvements de personnes, camions ou animaux (Guinat et al. 2018). Pour comprendre cette épizootie et anticiper les prochaines crises sanitaires, il apparaît nécessaire d'étudier la contribution relative des différentes voies de transmission (Table 1) à la propagation du virus.

Table 1 : Principales voies d'introduction du virus influenza aviaire en élevage pendant l'épizootie de 2016-2017 (liste non exhaustive)

Contacts directs	Contacts indirects
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voisinage <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Avec d'autres élevages</li> <li>▪ Avec d'autres espèces porteuses (basse-cour...)</li> </ul> </li> <li>• Introduction d'animaux contaminés</li> <li>• Faune sauvage (prédateurs, faune commensale...)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispersion aéroportée des particules virales</li> <li>• Vecteurs mécaniques <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Personnes (éleveurs, vétérinaires, intervenants extérieurs, famille...)</li> <li>▪ Véhicules (transport, équarrissage, fournisseur...)</li> <li>▪ Matériel (engins agricoles, matériel d'abreuvement, de vaccination...)</li> <li>▪ Consommables (eau, aliments, lisier...)</li> <li>▪ Animaux (mouches, rongeurs...)</li> </ul> </li> </ul>

Au vu de l'organisation de la filière avicole palmipède, il apparaît évident le rôle central qu'occupent les transporteurs de canards dans le bon fonctionnement du système de production. Cependant, comme évoqué plus haut, ces mouvements de véhicules peuvent participer à la dissémination du virus, de deux façons : de façon directe, par introduction d'animaux infectés dans des élevages sains, et de façon indirecte, par transport mécanique des particules virales d'un élevage à l'autre. Durant l'épizootie, des mesures de quantité d'aérosols virales ont démontré que le virus pouvait se trouver dans l'air jusqu'à 100 mètres en dehors des exploitations. Le dépôt et la diffusion de ces particules virales sur des surfaces inertes telles que les camions est ainsi une possibilité bien réelle (Scoizec et al. 2018).

Si les mouvements d'animaux entre élevage sont largement étudiés (Fèvre et al. 2006 ; Green et al. 2006 ; Soares Magalhães et al. 2010), le rôle indirect des véhicules de transport est lui moins connu. Quelques études tendent pourtant à démontrer que cette voie de transmission peut

jouer un rôle non négligeable voir majeur dans la diffusion d'un agent infectieux (Dee et al. 2004 ; Ssematimba et al. 2012), malgré les nombreuses mesures de biosécurité mises en place pour limiter ce portage indirect (segmentation des élevages en aires de circulation, nettoyage-désinfection entre deux interventions, formation des intervenants...) (CIFOG et ITAVI 2016), et les mesures de restriction de déplacement en ZP et ZS (DGA1 2017) mises en place durant l'épizootie. Occulter cette voie peut ainsi amener à sous-estimer le risque réel représenté par le réseau de transport et fausser les modèles épidémiologiques utilisés pour simuler et contrer une épizootie (Bernini et al. 2019).

Une étude de 2019 semble démontrer que ces mouvements de véhicules ont activement contribué à l'apparition de nouveaux foyers durant l'épizootie d'IAHP de 2016/2017 (Guinat et al. 2019). Cependant, d'autres études sont nécessaires pour déterminer le rôle relatif des échanges d'animaux et de la transmission indirecte de ces mouvements de véhicules.

C'est l'objectif principal de ce travail : démontrer un rôle probable des mouvements de véhicules de transport dans la propagation du virus et en estimer l'importance, au-travers d'une analyse chiffrée du réseau de transport. Un objectif annexe est par ailleurs d'observer à quel point ce réseau de transport a été perturbé pendant l'épizootie.

# Matériel et Méthodes

## 1) Modélisation du réseau

Avant de présenter en détail le matériel et les méthodes d'analyses utilisés, il convient de définir un certain nombre de points de vocabulaire et de décrire la structure du réseau de transport.

### A) Les tournées

Partons de la plus petite unité du réseau : l'élevage. Celui-ci est caractérisé par son numéro de SIRET, par son nom ou le nom de l'éleveur, par son type de production (PAG ou GAV) et par sa localisation (commune, département, coordonnées géographiques). Dans le réseau de transport, les élevages sont regroupés entre eux par les tournées de camion. Une tournée est définie comme la visite de plusieurs élevages successifs par un même camion de transport, sans étapes de désinfection complète du camion entre les élevages. La tournée est caractérisée par sa date, l'immatriculation du véhicule et l'identification des élevages visités successivement. Au sein d'une tournée, le voyage d'un camion entre deux élevages est appelé trajet. La Figure 5 illustre le schéma classique d'une tournée.



Figure 5 : Exemple type du déroulé d'une tournée. PAG : *élevage prêt à gaver* ; GAV : *élevage de gavage*

Il existe ainsi plusieurs niveaux d'analyses : à l'échelle des élevages (pour une analyse descriptive de la population), à l'échelle des tournées (pour une analyse de l'activité des compagnies) et à l'échelle des trajets (pour étudier les connexions entre élevages). Cependant, se baser sur les trajets pour étudier les connexions entre élevages peut paraître insuffisant : en effet, si l'on revient sur la Figure 5, nous pouvons constater que PAG et GAV2 ne sont pas reliés par un trajet. Or il existe bien une connexion entre les deux élevages, par le passage d'un même camion chez les deux élevages et par l'envoi de canards depuis le PAG vers GAV2.

## B) Les réseaux de contact

Il convient donc, pour étudier les connexions entre élevages, d'utiliser une approche de réseau différente, qui fasse apparaître ces liens. Nous nous sommes inspirés pour la modélisation de ces réseaux de la méthode décrite par Salines et al. dans leur étude (Salines et al. 2017). L'étude de ce type de réseau est le meilleur moyen connu à l'heure actuelle pour comprendre et contrôler la propagation d'un agent infectieux (Marquetoux et al. 2016). Dans un premier type de réseau, tous les élevages d'une même tournée visités successivement par un camion de transport sont en lien épidémiologique. Ces liens forment un réseau, appelé Transit Network (TN), qui est illustré en Figure 6.

Dans un second type de réseau, seuls les élevages impliqués dans un transfert de canards sont connectés entre eux. Ce réseau, appelé Animal Introduction Network (AIN), est illustré en Figure 6. On note que dans ce modèle les GAV ne sont pas reliés entre eux car aucun n'animal n'est envoyé d'un GAV vers un autre.

On constate au vu de ces deux modèles que toutes les connexions présentes dans l'AIN le sont aussi dans le TN : en effet, si un élevage transfère des animaux vers un autre élevage, ils seront automatiquement liés par le passage du véhicule. Pour évaluer la contribution relative de chaque type de contact entre élevages, nous avons considéré un troisième réseau, nommé Transit Network spécifique (TNs), illustré en Figure 6, où ne figurent que les connexions entre élevages dues uniquement à un mouvement de véhicule.

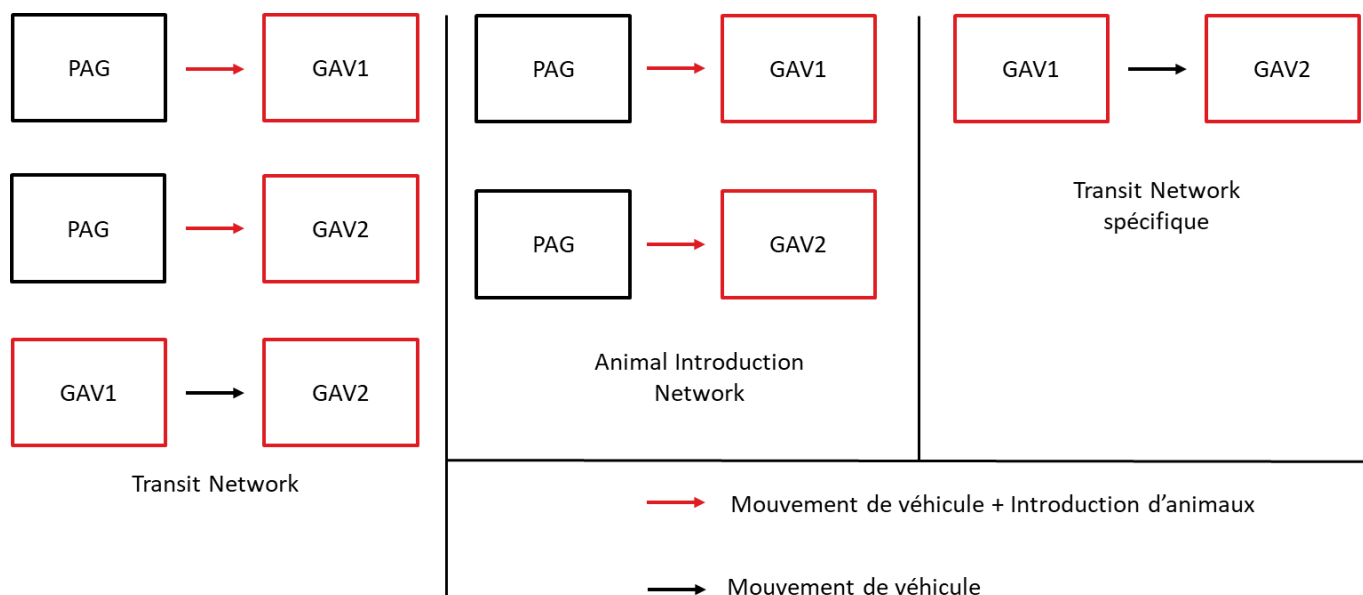


Figure 6 : Transit Network, Animal Introduction Network et Transit Network spécifique d'une tournée PAG → GAV1 → GAV2. PAG : élevage prêt à gaver ; GAV : élevage de gavage

## 2) Création des bases de données

### A) Matériel de base

Nous sommes partis de deux fichiers EXCEL® (Microsoft Corporation 2018), fournis par deux compagnies de transports opérant dans le Sud-Ouest de la France, qui seront dans la suite de ce travail nommées compagnies 1 et 2 par souci de confidentialité. Ces fichiers recensent les tournées de livraison de canard effectuées par ces compagnies, sur les périodes du 07/01/2017 au 24/07/2019 (compagnie 1) et du 02/01/2016 au 31/12/2018 (compagnie 2).

### B) Transformation et création de données

#### i) *La base Eleveur*

Une première base de données, nommée 'Eleveurs', a été extraite des bases de données fournies par les transporteurs. Cette base recensait les éleveurs ayant eu recours à chacune des compagnies de transport, avec pour chacun leur nom, le numéro de SIRET de l'exploitation, le type de production (PAG ou GAV), l'organisme de production, la commune, et les coordonnées géographiques de l'exploitation. Pour les éleveurs concernés, les dates de suspicion et de



détection de l'infection de l'élevage par le virus de l'IAHP H5N8 lors de l'épizootie de 2016/2017 ont été récupérées depuis une liste des cas fournie par le ministère de l'Agriculture.

ii) *La base Tournée*

Dans cette seconde base, nommée 'Tournée', ont été recensées les tournées (telles que définies en introduction de ce chapitre) effectués par chaque compagnie. Pour chaque tournée sont extraites des bases initiales la date, l'immatriculation du véhicule et l'organisme de production concerné. La distance totale parcourue au cours de la tournée, la taille moyenne des chargements et des déchargements, le nombre de départements visités, le nombre de trajets et le nombre de PAG et de GAV impliqués dans la tournée ont été calculés en utilisant les informations fournies par les bases initiales. Enfin chaque tournée s'est vu attribuer un 'type de tournée', qui correspond à un patron décrivant les types d'élevages successifs visités par le camion (par exemple, PGG signifie que le camion a chargé chez un PAG puis est allé décharger chez deux GAV successifs, PPG signifie que le camion a chargé chez deux PAG successifs puis a déchargé chez un seul GAV).

iii) *Les bases Animal Introduction Network (AIN), Transit Network (TN), et Transit Network spécifique (TNs)*

Dans ces trois bases sont recensées toutes les connexions entre élevages, par le passage d'un camion (TNs), par le transfert de canards (AIN) et par les deux (TN). Pour chaque connexion, des informations relatives aux deux élevages impliqués (numéro de SIRET, nom, commune, département, type de production et coordonnées géographiques), ainsi que la date ont été extraites des bases initiales. L'immatriculation du véhicule, l'organisme de production et le type de la tournée dans le cadre de laquelle chaque connexion est réalisée sont extraits de la base 'Tournée'. Enfin pour la base Animal Introduction Network, qui concerne un transfert de canards vivants, le nombre de canards transférés du premier au second élevage a été extrait des bases initiales.

Plusieurs connexions sont faites entre le même élevage, du fait de l'activité mixte de certains éleveurs (PAG et GAV), lorsque cet éleveur « envoie » des canards de son atelier PAG vers son atelier GAV. Ces connexions ont été enlevées par la suite pour nos analyses.

### **3) Analyses des réseaux**

#### **A) Etude descriptive des compagnies**

Une analyse descriptive de l'activité des compagnies a été réalisée à partir de la base éleveur. Pour chaque compagnie, le nombre différents d'éleveurs (au total et répartis par leur type d'activité : PAG, GAV ou mixte) et d'organismes de production ayant eu recours à leur service, le nombre de communes et de départements différents où un camion s'est arrêté et le nombre de véhicules différents utilisés ont été calculés. Des cartes de la France montrant la répartition géographique des élevages visités (par département et par communes) ont été générées.

#### B) Etude de l'évolution temporelle de l'activité des compagnies

Une analyse quantitative et temporelle de l'activité des compagnies a été réalisée à partir de la base tournée. Pour chaque compagnie, le nombre total de tournée réalisée sur la période d'enregistrement, ainsi que le nombre de chaque type de tournée ont été calculés. Les distributions du nombre de départements visités par tournée et de la distance parcourue entre le premier élevage et le dernier élevage par tournée ont été calculées. Enfin, les évolutions mensuelles du nombre de tournées, du nombre moyen d'élevages de type PAG et GAV visités par tournée, du nombre de départements visités par tournée, de la distance des tournées, ainsi que du nombre de véhicules différents utilisés ont été calculées. Toutes ces analyses ont été réalisées via le logiciel R version 3.6.3 (R Core Team 2020).

#### C) Etude de l'impact des mouvements de véhicules sur la dissémination du virus

##### i) *Test statistique*

Les connexions entre élevages ont été analysées en utilisant le k-test proposé par VanderWaal et al. (VanderWaal et al. 2016). La première étape du test est de quantifier le nombre de connexions « à risque » (i.e. pouvant expliquer une transmission du virus de l'IAHP entre deux foyers) ayant eu lieu entre deux foyers durant l'épizootie. Une connexion a été considérée comme « à risque » quand elle a eu lieu entre deux foyers, dans les 14 jours précédant chaque suspicion d'infection (qui aboutira sur une déclaration de foyer, à la suite de l'isolation du virus ou à un test PCR sur au moins un animal de l'élevage). La seconde étape du test est ensuite de générer des réseaux de transport où la survenue des foyers est indépendante des réseaux de contact. Pour cela, nous avons permuté aléatoirement les identifiants des élevages foyers. Pour chaque réseau de transport simulé (i.e. sous l'hypothèse nulle d'une absence de lien entre infection et réseau), nous avons calculé le nombre de connexions à risque. Enfin, pour un réseau donné, en calculant la proportion de connexions à risque sous l'hypothèse nulle supérieure ou égale au nombre de connexions à risque calculé dans le réseau, nous pouvons mesurer la probabilité d'observer le nombre de connexions à risque sous l'hypothèse d'absence de lien

entre infection et réseau. Si cette probabilité est inférieure à 5%, nous pouvons en conclure qu'il existe un lien entre le réseau et la survenue d'infections.

Ce k-test a été réalisé sur les trois réseaux (TN, AIN et TNs), en associant les données des deux compagnies. Il a été réalisé sur l'ensemble de la période épidémique, mais aussi chaque mois (novembre 2016, décembre 2016, janvier 2017, février 2017 et mars 2017).

## ii) Calculs d'indices

Enfin une série d'indices pour « quantifier » le rôle possible des voies de transmission a été calculée, pour chaque réseau (AIN, TN et TNs). Un schéma explicatif est associé à chaque indice pour faciliter leur compréhension et leur interprétation. Ce schéma reprend un réseau fictif durant une épizootie, composé uniquement de connexions PAG -> GAV (Figure 7). Chaque date de connexion, ainsi que chaque date de suspicion pour un foyer sont indiquées. Dans ce réseau fictif, nous faisons apparaître plusieurs cas de figure, présents dans la réalité : des élevages sains connectés entre eux, des foyers connectés entre eux moins de 14 jours avant les dates de suspicions (connexions à risque), ou plus de 14 jours avant les dates de suspicion et des foyers connectés à des élevages sains.

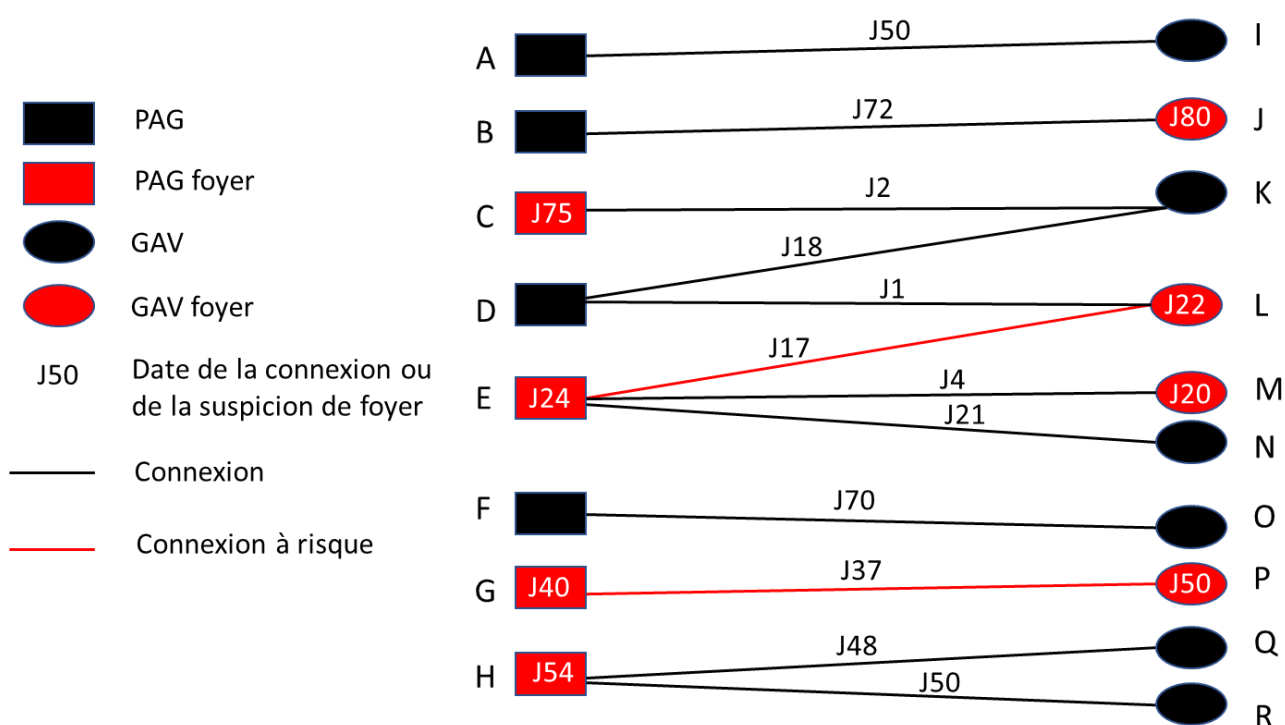


Figure 7 : Schéma illustrant un réseau fictif de mouvements de véhicules pendant une épizootie. PAG : élevage prêt à gaver ; GAV : élevage de gavage

Le premier indice, l'indice A, est **la proportion des mouvements totaux durant l'épizootie ayant pu propager le virus**, calculée comme le nombre de connexions à risque sur le nombre de connexions totales durant l'épizootie. Cet indice permet d'évaluer le risque global représenté par les mouvements de véhicules. Il s'illustre dans notre schéma explicatif (Figure 8) par le rapport des connexions rouges (connexions à risque) sur l'ensemble des connexions (rouges + noires).

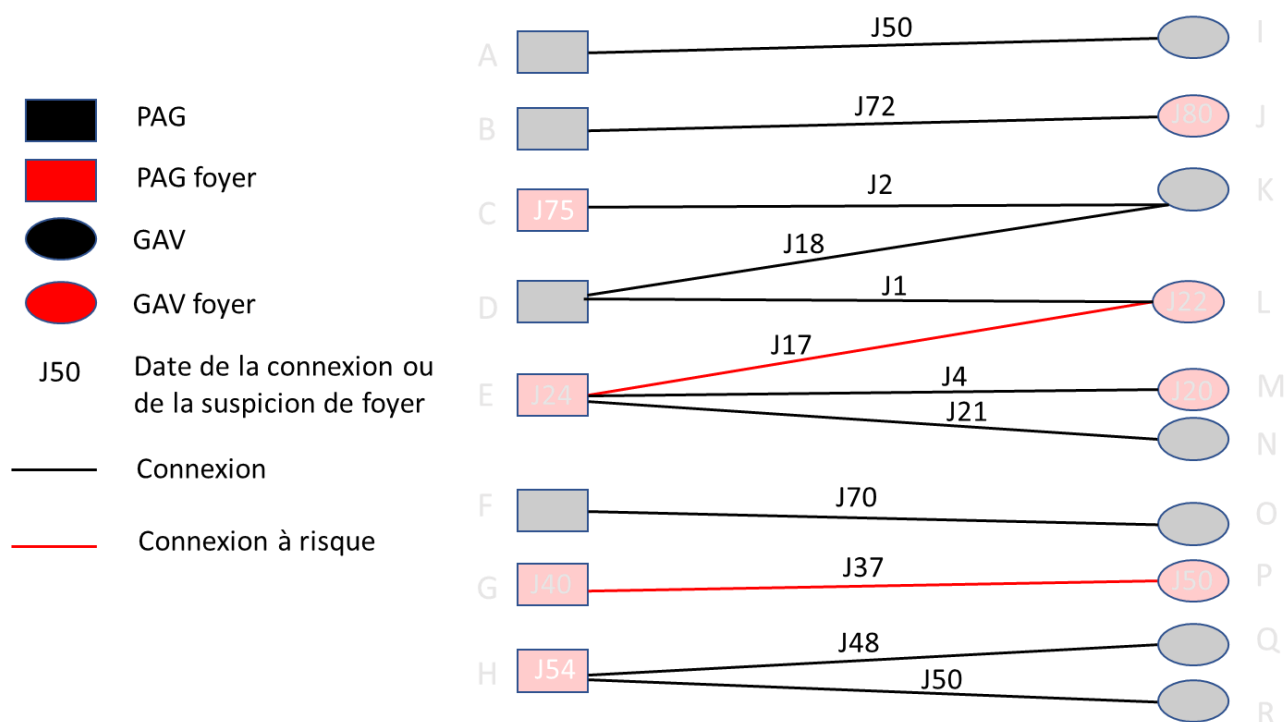


Figure 8 : Schéma illustrant la proportion des mouvements totaux durant l'épizootie ayant pu propager le virus. Les élevages et connexions non impliqués dans le calcul de l'indice sont grisés. PAG : élevage prêt à gaver ; GAV : élevage de gavage

Le second indice, l'indice B est **la proportion des foyers pour lesquels l'entrée du virus dans l'élevage peut être imputable au mouvement de véhicule**, calculée comme le nombre d'élevage en aval d'une connexion à risque sur le nombre de foyers. Il permet là aussi d'évaluer le risque global représenté par les mouvements de véhicules, mais en se basant du point de vue des élevages, et non des connexions. Il correspond dans notre réseau fictif (Figure 9) au rapport entre les deux élevages en aval d'une connexion à risque (élevages L et P) sur l'ensemble des foyers (C, E, G, H, J, L, M et P).

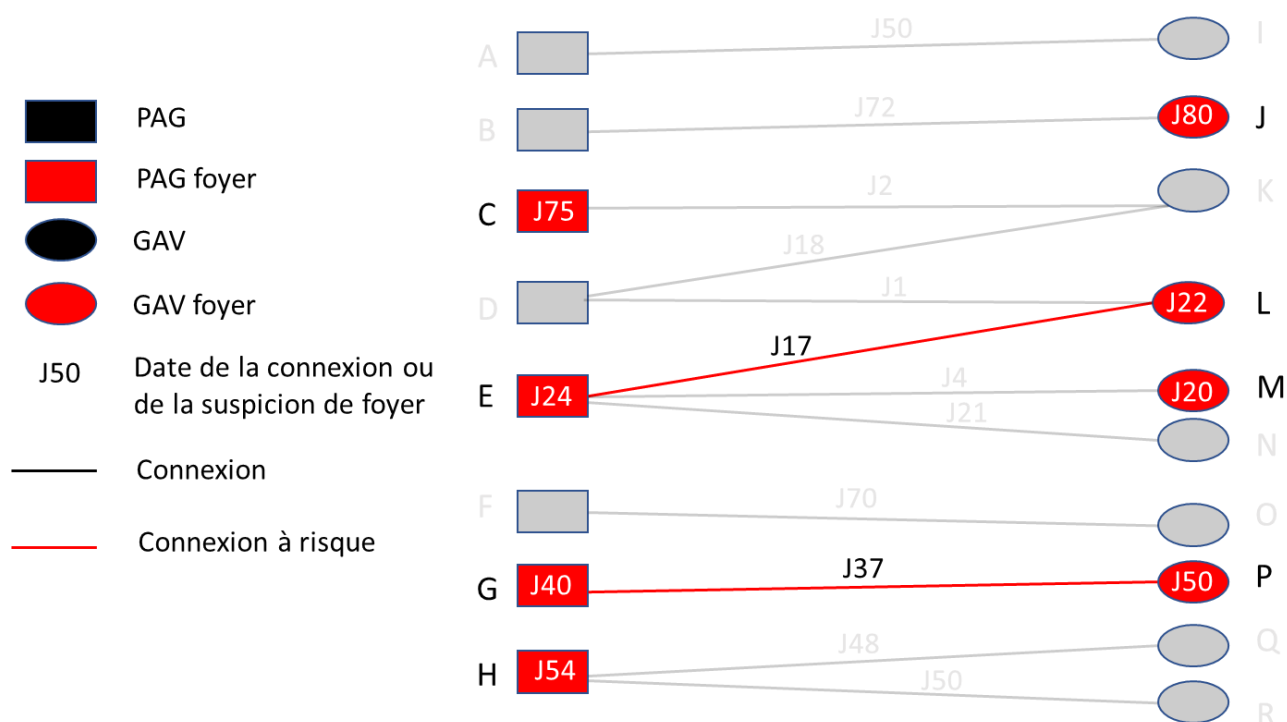


Figure 9 : Schéma illustrant la proportion des foyers pour lesquels le mouvement de véhicule peut être imputable pour l'entrée du virus dans l'élevage. Les élevages et connexions non impliqués dans le calcul de l'indice sont grisés. PAG : élevage prêt à gaver ; GAV : élevage de gavage

Le troisième indice, l'indice C, est le **risque de transmettre le virus par les mouvements de véhicules depuis un foyer**, estimé en faisant le rapport du nombre d'élevage en amont d'une connexion à risque sur le nombre de foyers en amont d'au moins une connexion dans les 14 jours précédant la date de suspicion. Cet indice situationnel permet d'évaluer cette fois-ci le risque relatif lié aux mouvements de véhicules : dans le cas où un élevage infecté est à l'origine de mouvements de véhicule, quel est le risque que les élevages en aval de ce mouvement soient contaminés ? Cet indice correspond dans notre réseau fictif (Figure 10) au rapport entre les foyers en amont d'une connexion à risque (élevages E et G) sur l'ensemble des foyers en amont d'une connexion dans les 14 jours précédant la date de suspicion (élevages E, G et H).

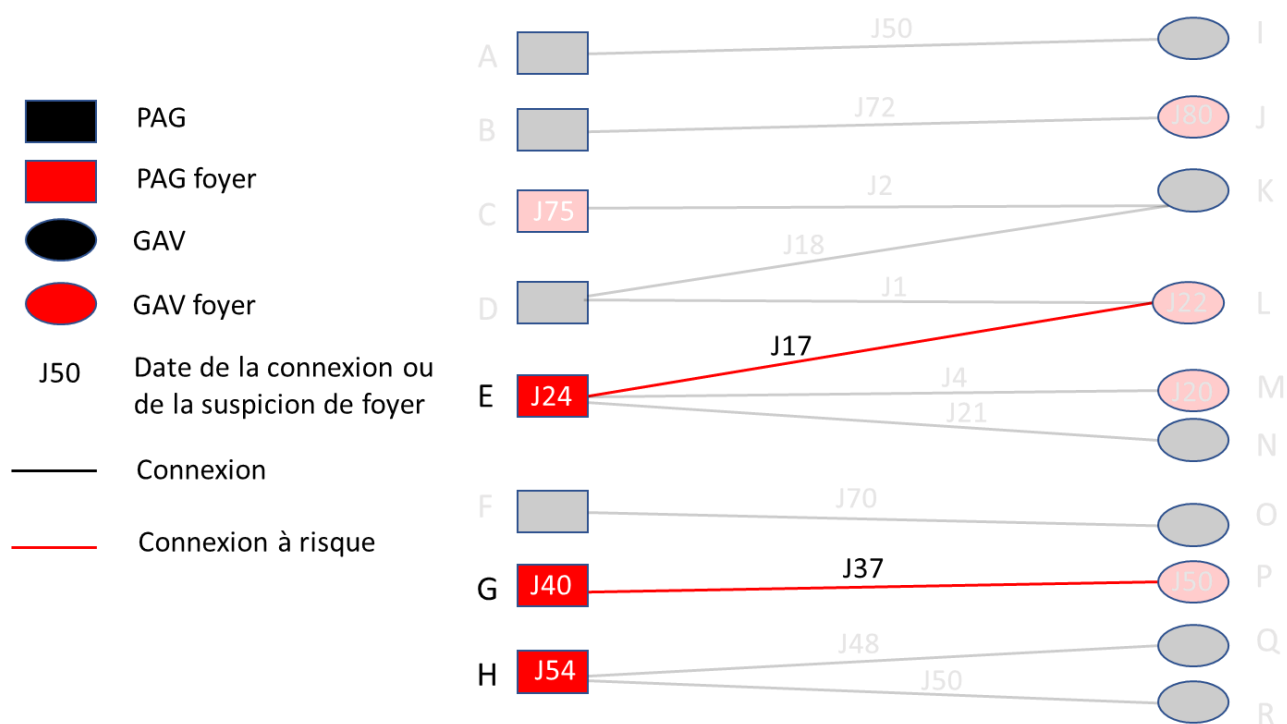


Figure 10 : Schéma illustrant le risque de transmettre le virus par les mouvements de véhicules depuis un foyer. Les élevages et connexions non impliqués dans le calcul de l'indice sont grisés.  
PAG : élevage prêt à gaver ; GAV : élevage de gavage

Le dernier indice, l'indice D, est **le risque de propager le virus à chaque mouvement de véhicule depuis un foyer**, estimé en faisant le rapport du nombre de connexions à risque sur le nombre de connexions partant d'un foyer dans les 14 jours précédant la date de suspicion. Cet indice est similaire à l'indice précédant : on se pose dans le cas où des véhicules partent d'un élevage infecté, et on calcule cette fois-ci non pas la proportion de foyers en aval de ces mouvements, mais la proportion des mouvements infectants. Cela correspond dans notre réseau fictif (Figure 11) au rapport entre les connexions à risque (mouvements supposés infectant, entre les élevages E et L puis G et P) sur tous les mouvements partant d'un foyer dans les 14 jours précédant sa date de suspicion (les deux mouvements précédemment cités + les mouvements qui auraient pu disséminer le virus, mais qui ne l'ont a priori pas fait, entre les élevages E et N, H et Q puis H et R).

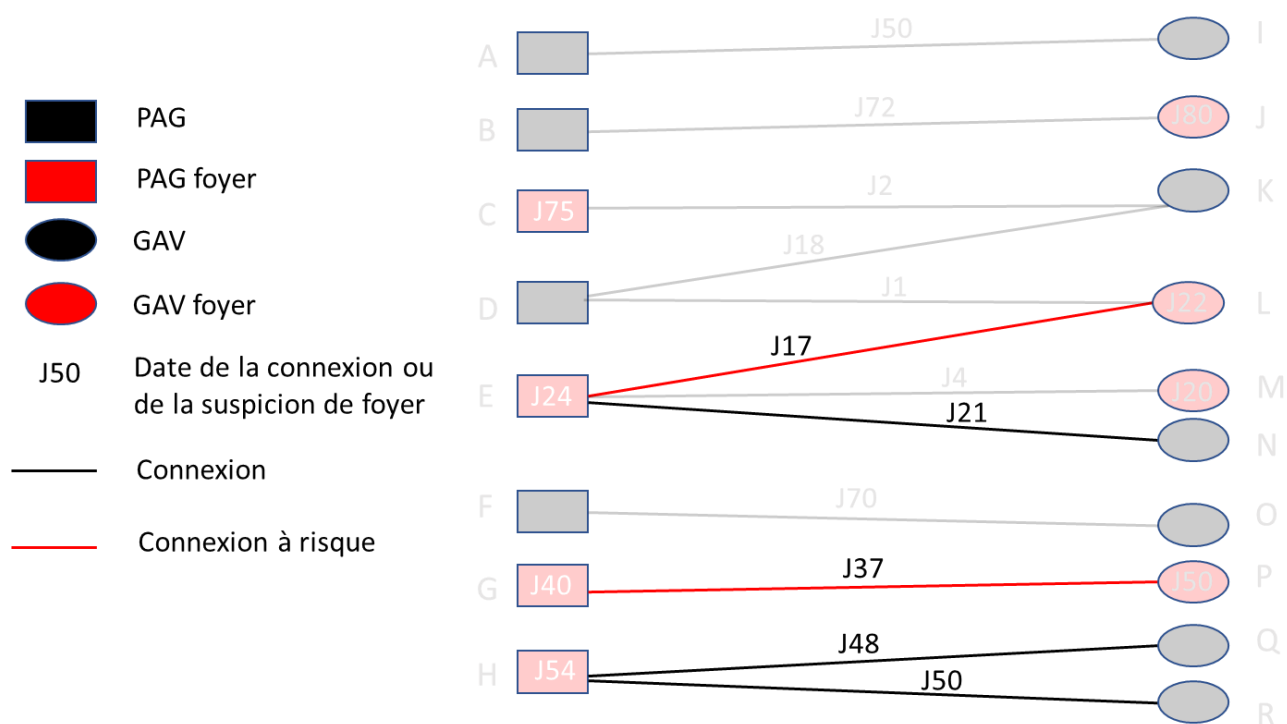


Figure 11 : Schéma illustrant le risque de propager le virus à chaque mouvement de véhicule depuis un foyer. Les élevages et connexions non impliqués dans le calcul de l'indice sont grisés.  
 PAG : élevage prêt à gaver ; GAV : élevage de gavage

Ces indices ont ainsi été calculés pour chaque réseau, afin d'avoir une interprétation possible pour les deux types de transmission : les résultats obtenus à partir de l'AIN nous enseigneront sur les transferts d'animaux, les résultats obtenus à partir du TNs nous enseigneront sur le portage passif des camions, et les résultats obtenus à partir du TN nous renseigneront sur les mouvements de véhicule dans leur globalité.

# Résultats

## 1) Analyses descriptives

Sur les périodes d'études, pour respectivement les compagnies 1 et 2 : 701 et 613 éleveurs ont eu recours aux services de ces compagnies, dont 298 et 302 PAG, 301 et 243 GAV et 102 et 68 mixtes, comme synthétisé dans la Table 2. Sept et 17 organismes de productions ont fait appels à ces compagnies. L'activité a été répartie sur 511 et 474 communes et sur 13 et 22 départements illustrés en Figures 12 et 13. Pour la réalisation des transports, 43 et 56 véhicules différents ont été utilisés.

Table 2 : Description numérique des deux compagnies

	Compagnie 1	Compagnie 2
Nombre d'élevages	701	613
Nombre de PAG	298	302
Nombre de GAV	301	243
Nombre d'élevages mixtes	102	68
Nombre d'organismes de production associés	7	17
Nombre de véhicules utilisés	43	56
Nombre de départements couverts	13	22
Nombre de communes couvertes	511	474

*PAG : élevage prêt à gaver ; GAV : élevage de gavage*



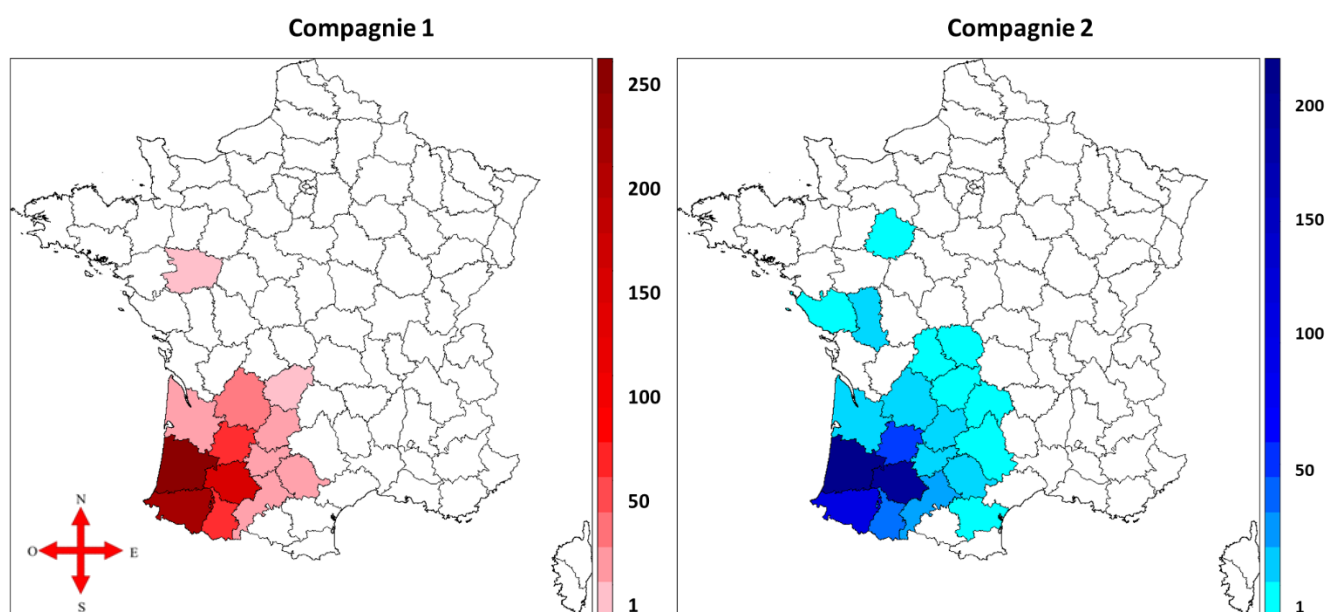


Figure 12 : Répartition départementale des élevages impliqués dans au moins une tournée pour chaque compagnie

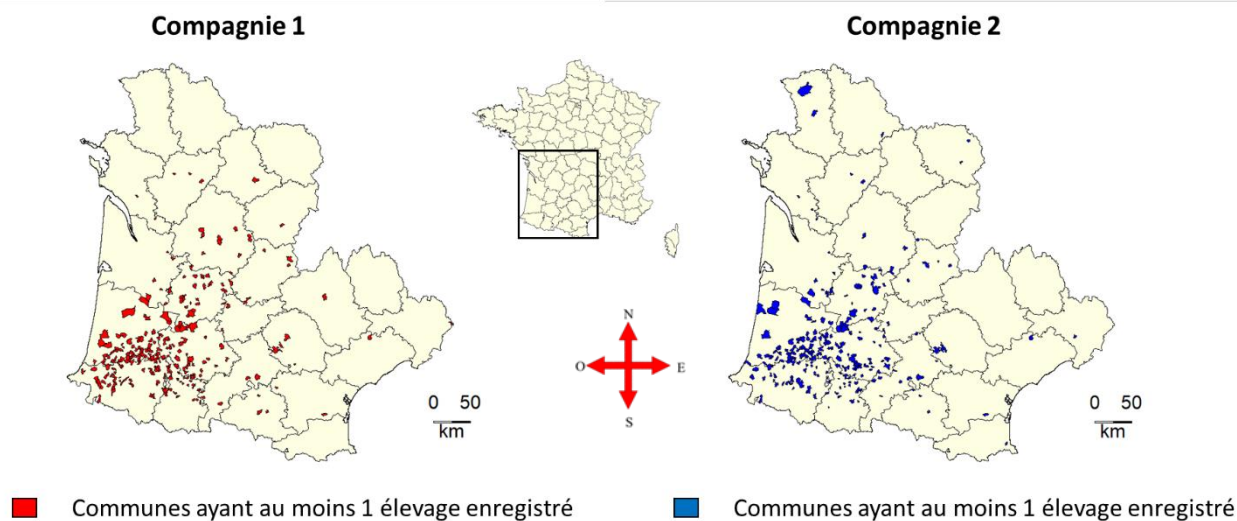
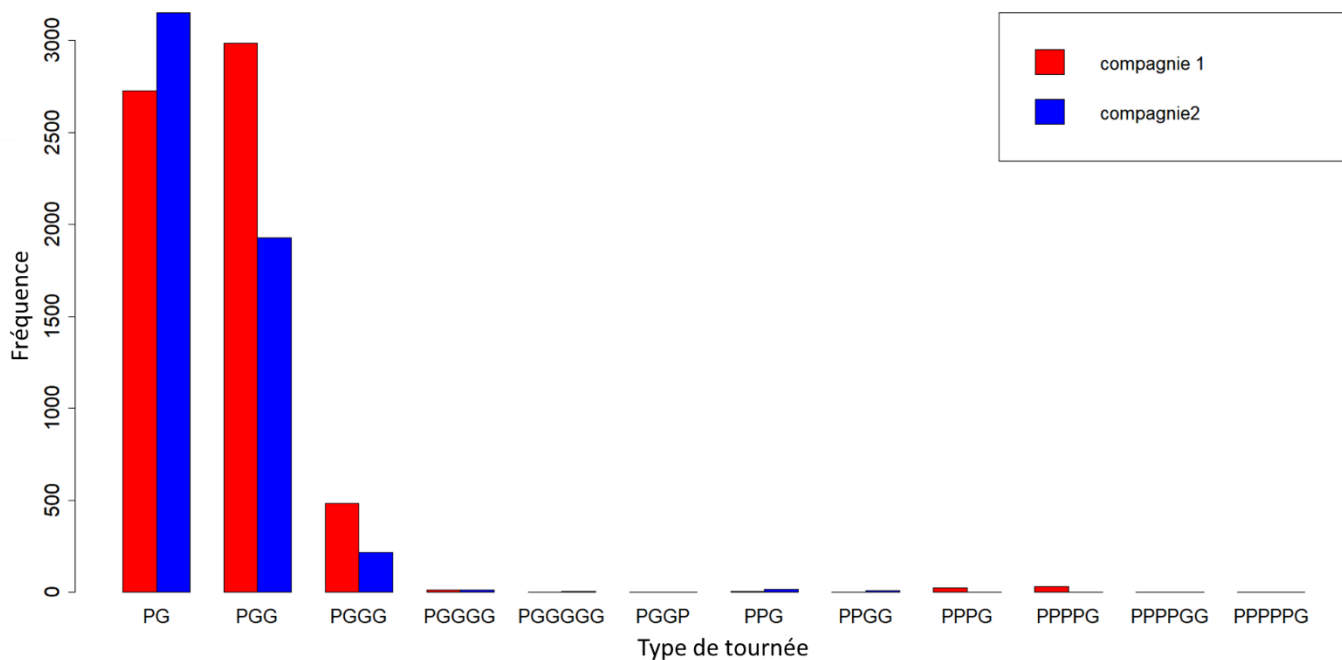


Figure 13 : Répartition communale des élevages impliqués dans au moins une tournée pour chaque compagnie

Les compagnies 1 et 2 ont réalisé respectivement 6272 et 5342 tournées sur les périodes d'étude (du 07/01/2017 au 24/07/2019 pour la compagnie 1 et du 02/01/2016 au 31/12/2018 pour la compagnie 2). Le type de tournée majoritaire était le PGG pour la compagnie 1 (47.6%, 2985 tournées) et le PG pour la compagnie 2 (59 %, 3150 tournées). Le second type de tournée le plus fréquent était inversement le PG pour la compagnie 1 (43.4 %, 2725 tournées) et le PGG

pour la compagnie 2 (36,1 %, 1929 tournées). Ces deux types de tournée (PG et PGG) représentaient plus de 90% des types de tournée chez les deux compagnies. L'immense majorité des tournées ne comportait qu'un PAG (98.9% pour la compagnie 1, 99.4 % pour la compagnie 2).

La répartition des types de tournée par compagnie est illustrée en Figure 14.



**Figure 14 : Distribution des types de tournée pour chaque compagnie.** *Rappel : chaque type de tournée correspond à un patron décrivant les types d'élevages successifs visités par le camion, P signifiant PAG et G signifiant GAV (par exemple, PGG signifie que le camion a chargé chez un élevage prêt-à-gaver puis est allé décharger chez deux élevages de gavage successifs)*

Pour les deux compagnies, les tournées ont majoritairement eu lieu sur deux départements différents (57.9 % pour la compagnie 1 et 60.6 % pour la compagnie 2). Une grande partie des tournées parcouraient des distances entre 20 et 80 km (68.7% pour la compagnie 1 et 49.7 % pour la compagnie 2), et très peu de tournées dépassaient les 150 km de distance (3,2 % pour la compagnie 1 et 10,8 % pour la compagnie 2). Les distributions du nombre de départements visités par tournée et de la distance moyenne des tournées sont illustrées en Figures 15 et 16.

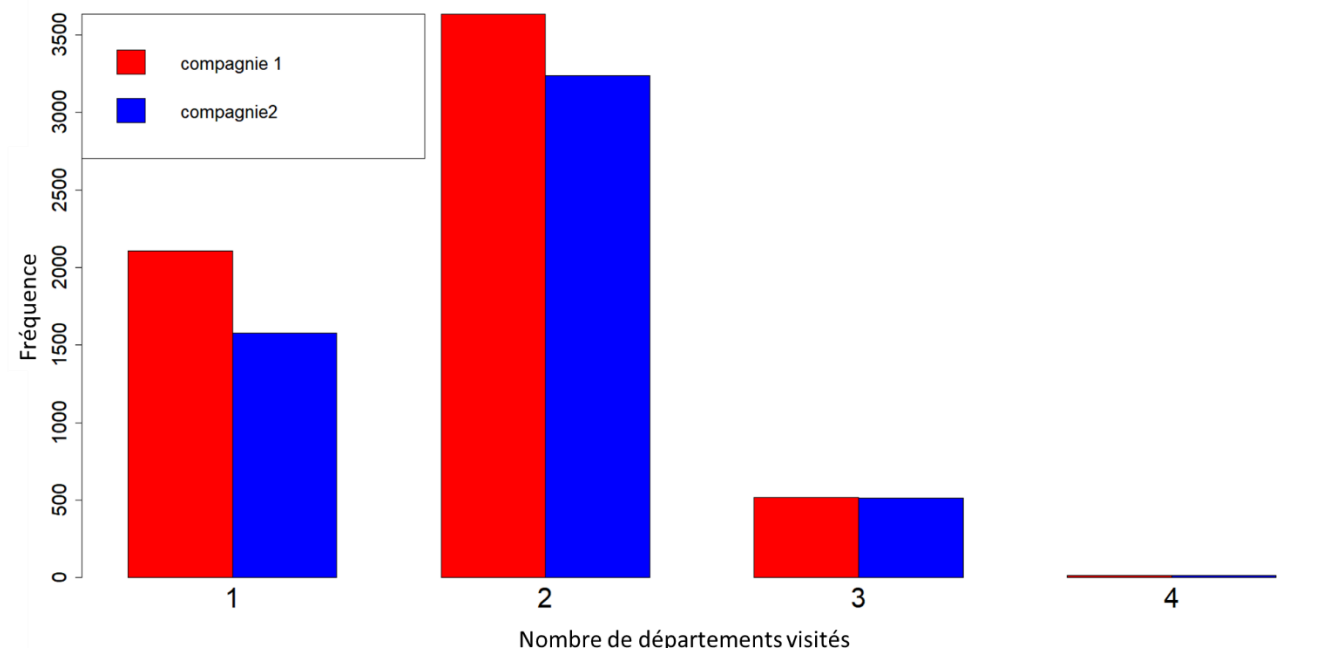


Figure 15 : Distribution du nombre de départements visités par tournée pour chaque compagnie

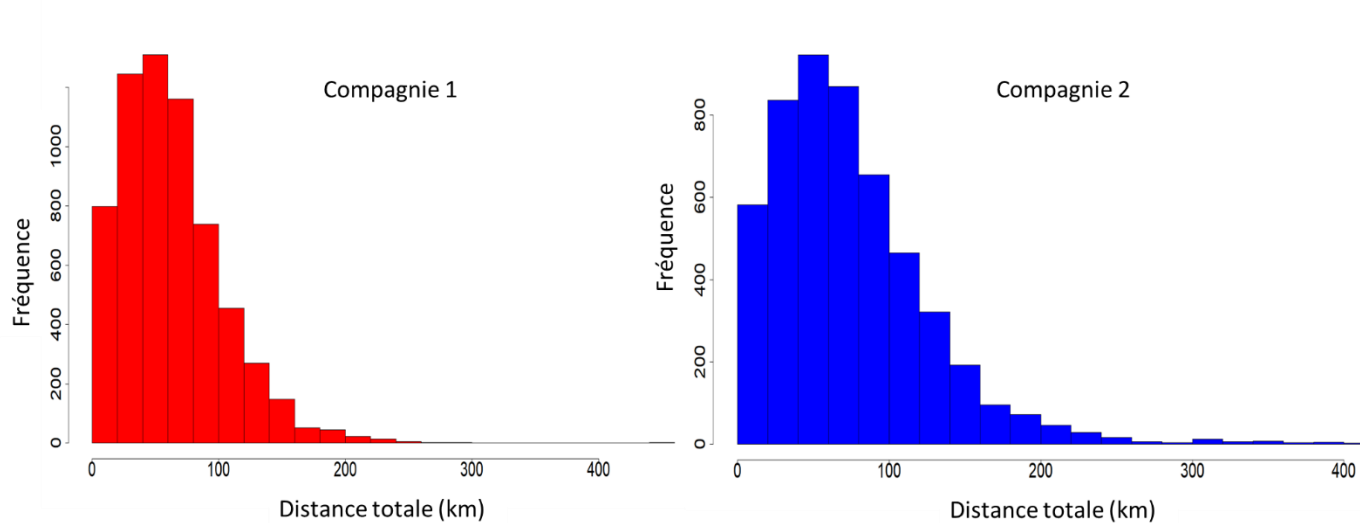


Figure 16 : Distribution de la distance moyenne des tournées pour chaque compagnie

## 2) Evolution mensuelles

On rappelle avant toute chose que les périodes d'études sont différentes pour les deux compagnies ; les courbes relatives à chaque compagnie n'occupent ainsi pas la totalité du graphique. La période de l'épizootie a été délimitée en noir sur nos graphiques pour plus de compréhension.

### A) Evolution mensuelle du nombre de tournées

L'évolution mensuelle du nombre de tournées réalisées par les deux compagnies est représentée en Figure 17. Pour les deux compagnies, le nombre de tournées a baissé pendant l'épizootie de 2016/2017 (ce nombre descendant à moins de 100 par mois pour les deux compagnies), puis l'activité a lentement repris après l'épizootie (en juillet 2017 seulement). En outre le nombre de tournées baissait cycliquement au moment des hivers 2018 et 2019, après un pic atteint en octobre-novembre pour les deux compagnies. Pour la compagnie 2, nous avons constaté enfin une absence totale de tournée aux mois de mai et juin 2016, absence qui se concrétise dans tous nos graphiques par une cassure de la courbe à ce moment-là, qui ne sera dès lors plus commentée outre-mesure.

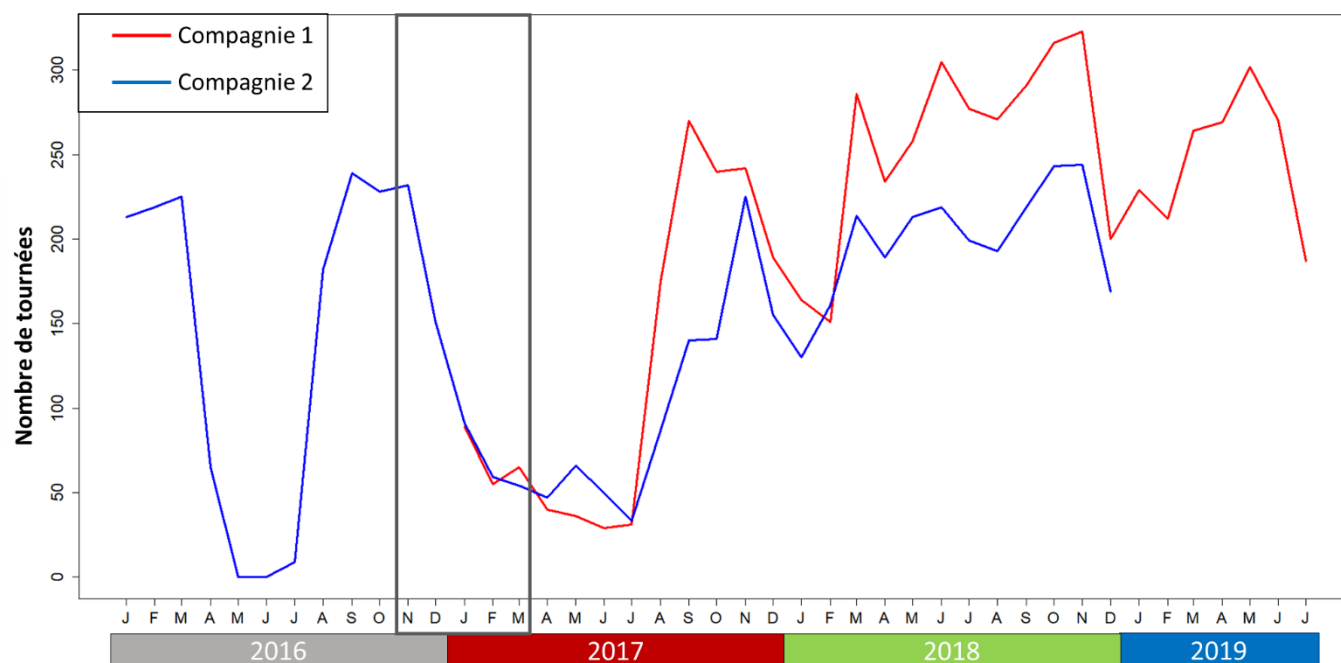


Figure 17 : Evolution mensuelle du nombre de tournées réalisées par chaque compagnie

## B) Evolution mensuelle du nombre moyen de PAG et de GAV visités par tournée

Nous avons ensuite étudié conjointement les évolutions mensuelles du nombre moyen d'élevage de type PAG et GAV visités par tournée, représentées en Figure 18.

Pour la compagnie 1, le nombre moyen de PAG par tournée était statistiquement significativement plus élevé pendant l'épizootie et les mois lui succédant (jusqu'en juillet 2017) que pendant le reste de la période d'étude (en moyenne 1,16 PAG par tournée entre janvier et juillet 2017, contre 1,02 après juillet 2017, p-value du test de Student = 0,01). Le nombre moyen de GAV par tournée était lui moins élevé sur cette même période (janvier 2017-juillet 2017) que pour le reste de la période d'étude (1,45 contre 1,64 GAV par tournée, p-value du test de Student = 0,006).

Pour la compagnie 2, mise à part pour le mois de janvier 2016, le nombre moyen de PAG par tournée avoisinait toujours un par tournée. En outre le nombre moyen de GAV par tournée a constamment baissé tout le long de l'épizootie, avant un retour progressif vers la valeur moyenne d'1,5 d'avril à juillet 2017.

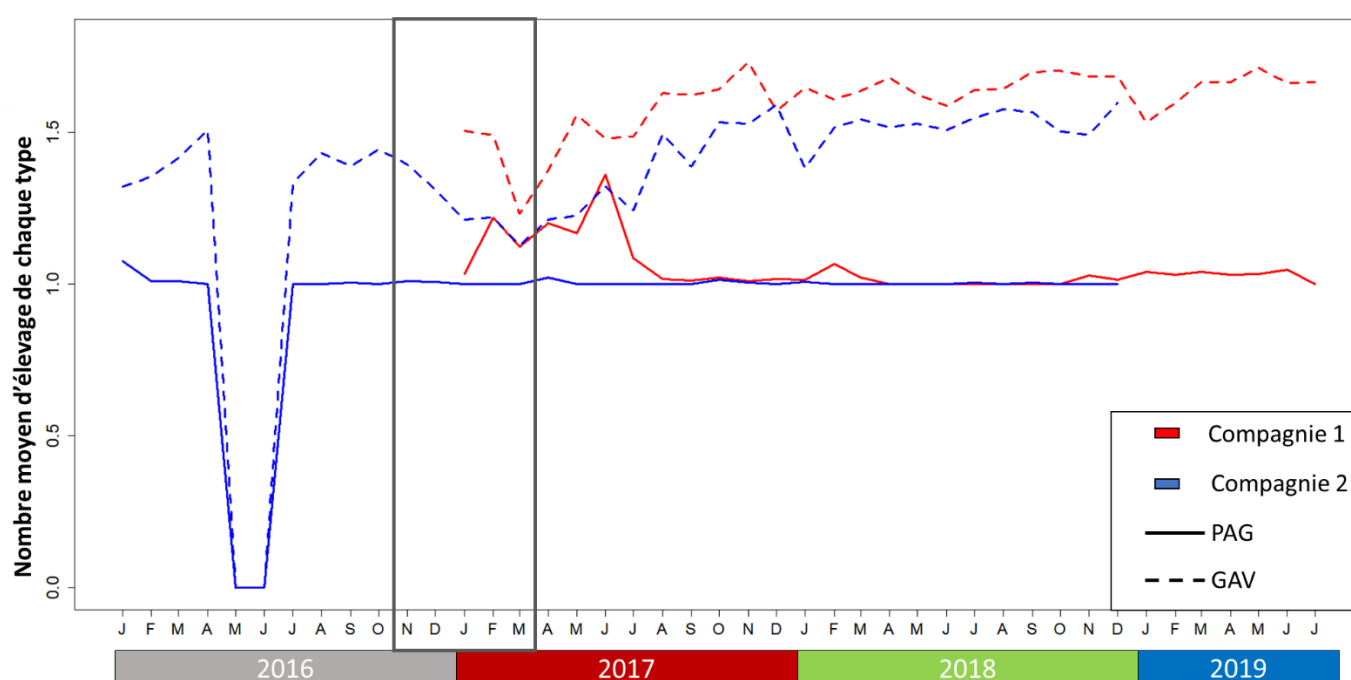


Figure 18 : Evolution mensuelle du nombre moyen de PAG et de GAV par tournée pour chaque compagnie

### C) Evolution mensuelle des distances de tournée et du nombre moyen de départements visités par tournée

Les évolutions mensuelles des distances de tournée et du nombre moyen de départements visités à chaque tournée sont illustrées en Figures 19 et 20. Pour la distance des tournées, nous avons fait le choix de faire apparaître la distribution des données sous formes de plages de couleurs s'étalant du 25<sup>e</sup> centile au 75<sup>e</sup> centile (rouge foncé pour la compagnie 1, bleu foncé pour la compagnie 2), car le nombre de valeurs prises par ce paramètre est suffisamment élevé pour étudier sa distribution.

Pour la compagnie 1, les tournées étaient en moyenne plus longues pendant l'épizootie et quelques mois après (jusqu'à juillet 2017) que pendant les mois qui suivent. A noter cependant ce fort pic inversé en mars 2017 en fin d'épizootie. Concernant le nombre de départements visités par tournée, nous avons distingué là aussi deux phases : avant juillet 2017, où les valeurs oscillaient sans réelle stabilité entre 1.4 et 2.1 départements visités par tournée en moyenne, et après juillet 2017 où toutes les valeurs oscillaient entre 1.7 et 1.9 départements visités par tournée.

Pour la compagnie 2, la distance moyenne des tournées est restée relativement stable tout le long de la période d'étude (entre 80 et 100 km), excepté pour deux mois : juin 2016 et mars 2017, en fin d'épizootie. Concernant le nombre de départements visités par tournée, les valeurs sont restées là aussi stables tout le long de la période d'étude (entre 1.6 et 1.8 départements visités par tournée en moyenne), excepté pour les mois de mars 2017 (1.5) et juin 2017 (2).

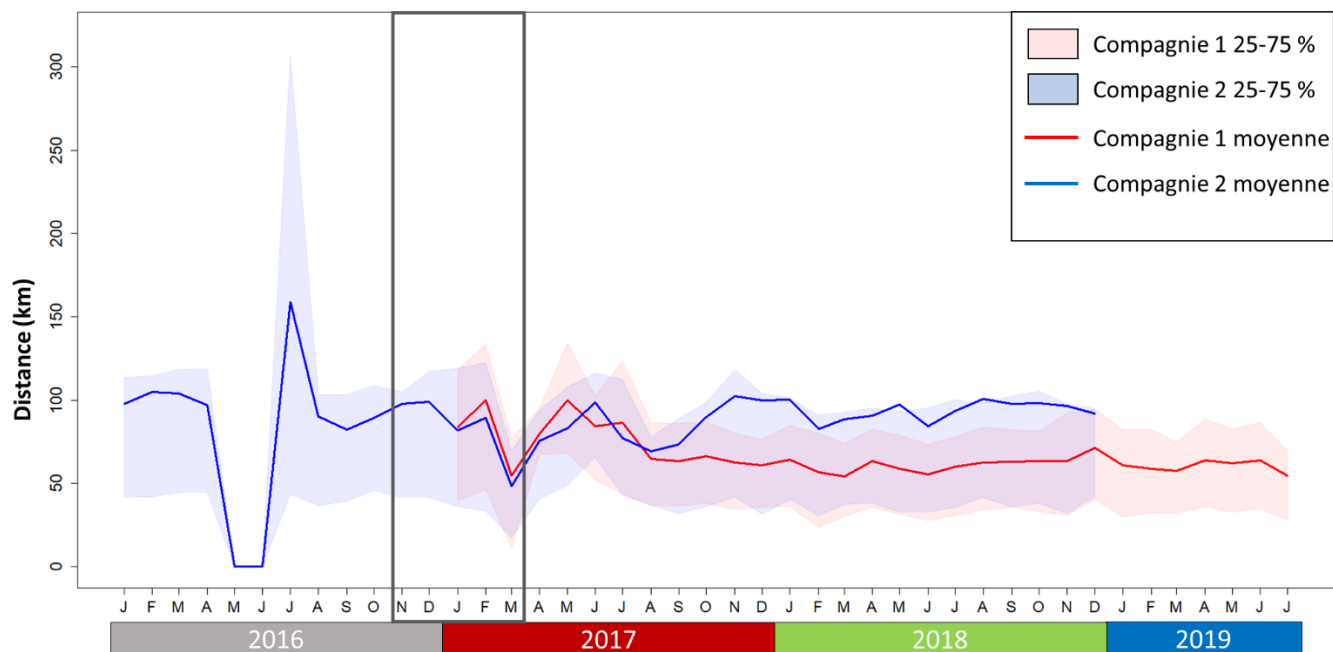
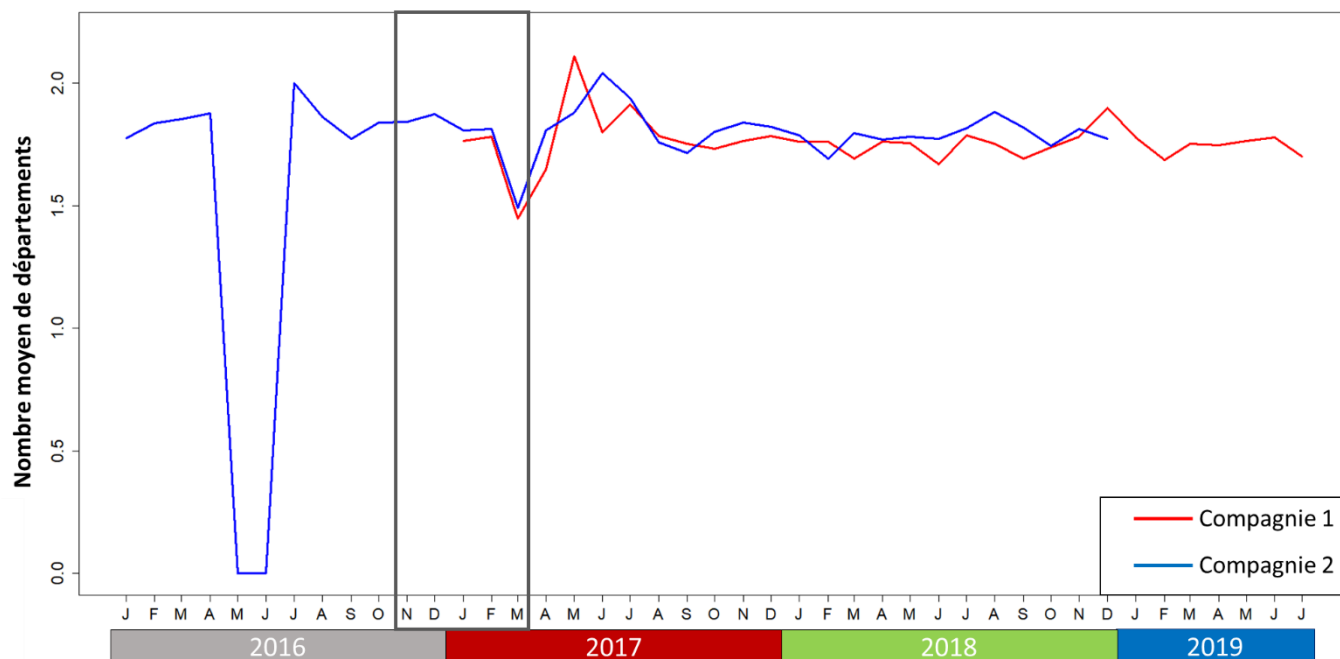


Figure 19 : Evolution mensuelle des distances de tournée pour chaque compagnie

Figure 20 : Evolution mensuelle du nombre moyen de départements visités par tournée pour chaque compagnie



#### D) Evolution mensuelle du nombre de véhicules différents utilisés

L'évolution du nombre de véhicules différents utilisés chaque mois est représentée en Figure 22.

Pour la compagnie 1, le nombre de véhicules différents utilisés n'a cessé de décroître depuis la fin de l'épizootie jusqu'à juin 2017, date à partir de laquelle ce nombre a réaugmenté vers une moyenne de 25 véhicules par mois, avec un pic à 34 véhicules en septembre 2017.

Pour la compagnie 2, il existe une différence significative entre le nombre moyen de véhicules utilisés chaque mois pendant l'année 2016, hors mai-juin et pendant les années 2017 et 2018 (26 véhicules par mois en 2016 contre 17,6 en 2017 et 16,7 en 2018, p-value du test de Student = 0,002 au test de Student). La baisse du nombre de véhicules utilisés concorde avec la période d'épizootie.

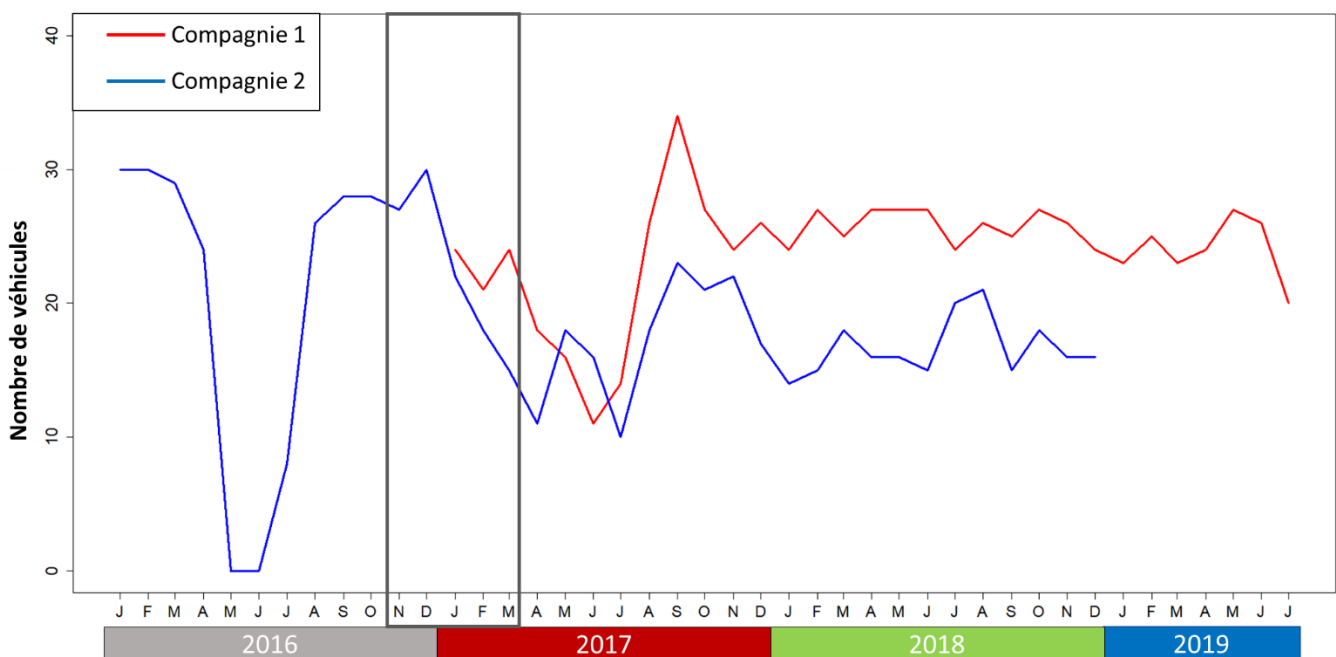


Figure 21 : Evolution mensuelle du nombre de véhicules différents utilisés pour chaque compagnie



### 3) Contribution des mouvements de véhicules à l'épizootie

#### A) Test statistique

Les distributions du nombre de connexions à risque calculées pour les réseaux aléatoirement générés (donc sous l'hypothèse nulle), et du nombre de connexions à risque calculés pour les réseaux réels sont résumées en annexes. Le nombre de connexions à risque pour les réseaux réels, la médiane et l'intervalle de confiance à 95 % (soit les valeurs des 2.5<sup>e</sup> et 97.5<sup>e</sup> centiles) de la distribution des nombres de connexions à risque pour les réseaux aléatoirement générés, et la p-value calculée sont résumés en Table 3, pour chaque variable testée.

Table 3 : Résumé des valeurs calculées via le k-test

Réseau Période	AIN					TNs					TN				
	Car	Me	2.5	97.5	Pv	Car	Me	2.5	97.5	Pv	Car	Me	2.5	97.5	Pv
<b>Tout</b>	7	0	0	1	<b>0</b>	6	0	0	1	<b>0</b>	13	0	0	3	<b>0</b>
<b>Novembre</b>	0	0	0	0	1	2	0	0	0	<b>0</b>	2	0	0	0	<b>0.001</b>
<b>Décembre</b>	2	0	0	1	<b>0.005</b>	2	0	0	0	<b>0</b>	4	0	0	1	<b>0</b>
<b>Janvier</b>	1	0	0	0	<b>0.032</b>	0	0	0	0	1	1	0	0	0	<b>0.033</b>
<b>Février</b>	4	0	0	1	<b>0</b>	2	0	0	1	<b>0.002</b>	6	0	0	1	<b>0</b>
<b>Mars</b>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

*Car : nombre de connexions à risque pour les réseaux réels ; Me, 2.5 et 97.5 : médiane, 2.5<sup>e</sup> et 97.5<sup>e</sup> centiles de la distribution des connexions à risque pour les réseaux aléatoirement générés ; Pv : P-value ; AIN : Animal Introduction Network ; TN : Transit Network ; TNs : Transit Network spécifique*

Sur l'ensemble de l'épizootie, la p-value calculée était inférieure à 0,05 quels que soient les réseaux. En d'autres termes, moins de 5% des nombres de connexions à risque calculés pour les réseaux permutés (sous l'hypothèse nulle) ont été supérieurs au nombre de connexions à risque observé pour les réseaux réels.

Le nombre de connexions à risque calculé à partir des réseaux réels était statistiquement plus élevé que ce à quoi on s'attendrait sous l'hypothèse nulle pour les mois et les réseaux suivants : AIN : décembre, janvier, février ; TNs : novembre, décembre, février ; TN : novembre, décembre, janvier, février.

## B) Description des connexions à risque

En considérant le réseau TN, qui représente l'intégralité des mouvements de véhicule, pour l'intervalle de 14 jours, nous avons dénombré 13 connexions à risque au total (sept d'entre elles issues de l'AIN, six du TNs). Ces 13 connexions à risque sont visualisées dans la Table 4, où les connexions liées à un élevage commun sont représentées par une même couleur. Trois tournées étaient composées uniquement de connexions à risque (ces tournées se superposent aux groupes de connexion gris, vert et bleu). Six connexions à risque sur les 13 ont eu lieu en début d'épizootie (entre le 26/11/2016 et 09/12/2016), une en milieu d'épizootie (21/01/2017) et six autres le même jour, en fin d'épizootie (17/02/2017). Six connexions ont impliqué des élevages dans les Landes, cinq dans le Gers, quatre dans les Pyrénées Atlantiques, une dans les Hautes-Pyrénées, et une dans le Lot-et-Garonne. La distribution spatio-temporelle des connexions à risque est illustrée en Figure 23.

Table 4 : Liste des connexions à risques

Date	Dep.Dpt	Dep.Type	Arr.Dpt	Arr.Type	Dep.Susp	Arr.Susp	Réseau
26/11/2016	47	GAV	32	GAV	08/12/2016	08/12/2016	TNs
30/11/2016	32	GAV	65	GAV	01/12/2016	01/12/2016	TNs
01/12/2016	32	GAV	32	GAV	14/12/2016	11/12/2016	TNs
02/12/2016	32	GAV	32	GAV	11/12/2016	10/12/2016	TNs
08/12/2016	32	PAG	32	GAV	11/12/2016	15/12/2016	AIN
09/12/2016	32	PAG	32	GAV	11/12/2016	15/12/2016	AIN
21/01/2017	40	PAG	64	GAV	01/02/2017	30/01/2017	AIN
17/02/2017	40	PAG	64	GAV	01/03/2017	01/03/2017	AIN
17/02/2017	64	GAV	64	GAV	01/03/2017	02/03/2017	TNs
17/02/2017	40	PAG	64	GAV	01/03/2017	02/03/2017	AIN
17/02/2017	40	GAV	40	GAV	23/02/2017	21/02/2017	TNs
17/02/2017	40	PAG	40	GAV	28/02/2017	23/02/2017	AIN
17/02/2017	40	PAG	40	GAV	28/02/2017	21/02/2017	AIN

*Date : date de la connexion ; Dep.Dpt : département de l'élevage de départ ; Dep.Type : type d'activité de l'élevage de départ (PAG ou GAV) ; Arr.Dpt : département de l'élevage d'arrivée ; Arr.Type : type d'activité de l'élevage d'arrivée ; Dep.Susp : date de suspicion de l'élevage de départ ; Arr.Susp : date de suspicion de l'élevage d'arrivée ; Réseau : type de réseau dans lequel s'inscrit la connexion ; AIN : Animal Introduction Network (transfert d'animaux) ; TNs : Transit Network spécifique (portage passif du véhicule) ; PAG : élevage prêt à gaver ; GAV : élevage de gavage*

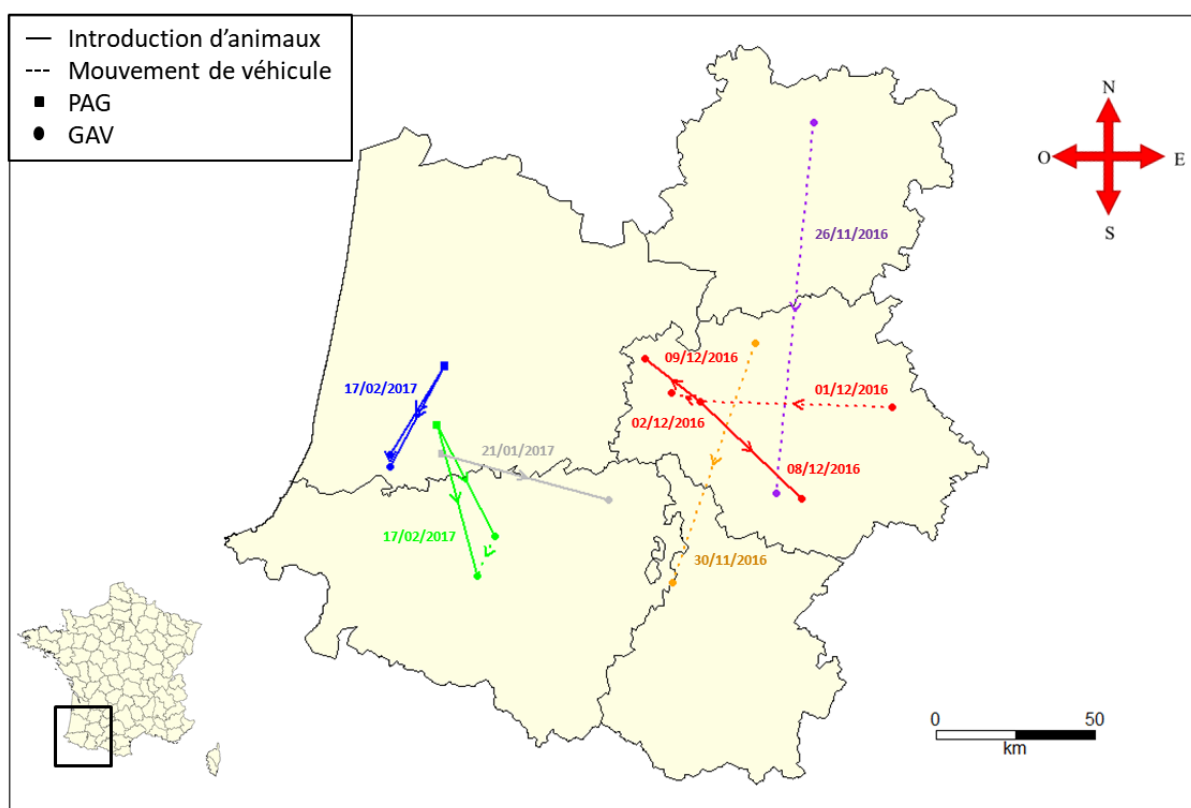


Figure 22 : Distribution spatio-temporelle des connexions à risque

### C) Calculs d'indices

Enfin les indices calculés pour quantifier le rôle de chaque voie de transmission sont synthétisés en Table 5.

Table 5 : Quantification du rôle potentiel joué par les mouvements de véhicules

	Indice A	Indice B	Indice C	Indice D
AIN	<b>0,66 %</b> (7/1062)	<b>3 %</b> (7/230)	<b>66,7 %</b> (4/6)	<b>38,9 %</b> (7/18)
TNs	<b>1,9 %</b> (6/316)	<b>2,6 %</b> (6/230)	<b>46,2 %</b> (6/13)	<b>37,5 %</b> (6/16)
TN	<b>0,95 %</b> (13/1378)	<b>4,8 %</b> (11/230)	<b>50 %</b> (9/18)	<b>38,2 %</b> (13/34)

*Indice A : proportion des mouvements totaux durant l'épizootie ayant pu propager le virus (= nombre de connexions à risque sur nombre de connexions totales ayant eu lieu pendant l'épizootie) ; Indice B : proportion des foyers pour lesquels l'entrée du virus dans l'élevage peut être imputable au mouvement de véhicule (= nombre d'élevage en aval d'une connexion à risque sur nombre de foyers) ; Indice C : risque de transmettre le virus par les mouvements de véhicules depuis un foyer (= nombre d'élevage en amont d'une connexion à risque sur nombre de foyers en amont d'au moins une connexion dans les 14 jours précédant la date de suspicion) ; Indice D : risque de propager le virus à chaque mouvement de véhicule depuis un foyer (= nombre de connexions à risque sur nombre de connexions partant d'un foyer 14 jours avant la date suspicion) ; AIN : Animal Introduction Network ; TN : Transit Network ; TNs : Transit Network spécifique*

Les connexions à risque n'ont représenté qu'une très faible partie de l'ensemble des connexions réalisées pendant l'épizootie (0,66 % des transferts d'animaux, et 0,95% des mouvements de véhicules – indice A). De même, très peu d'élevage ont pu s'infecter via les mouvements de véhicules (4,8 % des foyers sont la destination d'une connexion à risque – indice B). Cependant le risque qu'un élevage infecté transmette le virus à d'autres élevages via le réseau de transport était élevé : 50 % des élevages ayant déclaré un foyer dans les 14 jours suivant un mouvement de véhicule était en amont d'un élevage qui déclarera un foyer dans les 14 jours suivant ce mouvement (indice C). Cet indice reste élevé même pour le TNs, donc pour des mouvements de véhicules sans échange d'animaux. Chaque mouvement de véhicule partant d'un élevage infecté aurait ainsi eu environ 38% de chances de disséminer le virus, quelle que soit la voie (indice D).

# Discussion

## 1) Analyses descriptives

Nous pouvons constater au-travers de l'analyse descriptive que la production de palmipède à foie gras dans le Sud-Ouest est regroupée sur une zone géographique relativement restreinte, avec une forte concentration d'élevages à la frontière Gers-Landes où se situe la Chalosse, un territoire justement renommé par sa production de foie gras. C'est en effet une région qui était historiquement riche en champs de maïs, la céréale utilisée pour gaver les canards.

A noter qu'il existe un autre bassin, au Nord-Ouest (principalement en Vendée et dans les départements limitrophes), moins important en terme de production, qui n'est pas pris en compte dans nos données, car d'autres compagnies de transport officient dans ce secteur, et car l'épizootie n'y a pas eu cours (Agreste 2020 ; Bronner et al. 2017).

Concernant les types de tournée, les types majoritaires impliquaient un minimum d'élevages différents (2 dans le cas d'un PG, 3 dans le cas d'un PGG), ce qui est cohérent pour avoir un compromis entre normes de biosécurité (ne pas visiter trop d'élevages différents avec le même camion) et rentabilité du voyage (les ateliers de gavage étant souvent plus petit que les ateliers de prêt-à-gaver, il est donc souvent nécessaire de remplir un camion pour deux élevages différents).

Une grande majorité des tournées s'étalait sur deux départements ou plus, ce qui peut être un facteur de risque de propagation du virus à grande échelle. Les distances de tournée sont suffisamment élevées pour soupçonner une diffusion régionale du virus, mais sont trop faibles pour impliquer le réseau de transport à grande échelle. Une des raisons pour expliquer le fait que l'épizootie s'est cantonnée au Sud-Ouest et ne s'est pas étendue sur tout le territoire français, et notamment vers le Nord-Ouest, vers l'autre bassin de production, est peut être ainsi la concentration et l'exclusivité de l'activité aux seuls secteurs régionaux : il existe très peu d'échanges d'animaux entre les deux bassins de production (Guinat et al. 2020) ; de ce fait, si la forte concentration d'activité au niveau régional est un facteur de risque pour la diffusion du virus, le faible nombre d'échange apparent entre les deux bassins est un facteur limitant.

## 2) Evolutions mensuelles

Avant toute chose, il est important de remarquer qu'il est difficile d'évaluer l'impact de l'épizootie sur chacun de nos paramètres pour la compagnie 1, car les données ne commencent que durant l'épizootie. Il est ainsi impossible de comparer avec la situation antérieure à l'épizootie ; les interprétations des résultats observés sont donc à prendre avec précaution, dans le contexte d'incertitude décrit.

### A) Période épizootique

Le nombre de tournées par mois a été utilisé pour quantifier l'activité de chaque compagnie. Nous avons constaté dans un premier temps que cette activité était réduite pendant l'épizootie, ce qui est la conséquence des réglementations mises en œuvre au-cours de l'épizootie qui ont restreint les déplacements autour de chaque foyer de suspicion (DGAI 2017). Aussi, de plus en plus d'élevages se retrouvaient vidés de leurs animaux au fur et à mesure que l'épizootie progressait (à la suite des abattages), ce qui représentait forcément autant de trajets en moins pour les compagnies de transport.

Ces réglementations gouvernementales peuvent expliquer d'autre phénomènes : la baisse significative du nombre moyen de PAG par tournée au sortir de l'épizootie et du vide sanitaire 2017 pour la compagnie 1 est vraisemblablement due à la réglementation imposée par le gouvernement à partir du 12/01/2017 pour interdire les transports de volailles avec plusieurs chargements successifs au cours d'une tournée (DGAI 2017). Cette mesure avait pour but de limiter les mélanges de populations issues d'élevages différents, ce qui constitue un facteur de risque dans la diffusion de tout type d'agent pathogène, et ce dans tout type d'espèce (Choi et al. 2015 ; Hay et al. 2014). Le nombre plus réduit de GAV par tournée pendant l'épizootie peut lui être interprété comme la volonté de la part des professionnels du secteur de limiter au maximum les contacts entre élevages pour limiter le risque de propagation, et donc n'associer qu'un élevage PAG avec un élevage GAV à chaque voyage.

Le fort pic inversé au mois de mars 2017, en fin d'épizootie, pour les paramètres de distance de tournée et de nombre de départements différents visités, chez les deux compagnies, peut lui aussi être imputable à cette restriction de déplacement.

### B) En-dehors de l'épizootie

La reprise lente de l'activité suite à l'épizootie en 2017 a été due à un vide sanitaire imposé par l'état dans les élevages infectés (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

2017). L'absence de tournée en mai/juin 2016 pour la compagnie 2 a été due à une dépopulation totale des élevages du Sud-ouest, afin de contenir l'épizootie de 2015-2016 (DGA1 2016).

La baisse d'activité hivernale observée est vraisemblablement due à une demande réduite en foie gras après les fêtes de fin d'année : le pic d'activité est en effet atteint 1 mois avant ces fêtes, afin de placer un maximum de canard au gavage pendant le mois de décembre.

Pour la compagnie 2, la baisse significative du nombre de véhicules différents utilisés pendant l'épizootie, tendance qui s'est pérennisée le reste de l'année, peut être associée à une volonté de rentabiliser la flotte de véhicules, en effectuant un maximum de tournées avec un minimum de camions. Il est aussi possible d'imaginer qu'un certain nombre de véhicules utilisés avant l'épizootie ont été réformés, car ne répondant plus aux normes imposées pendant l'épizootie (DGA1 2018).

Pour les deux compagnies, le nombre moyen de véhicules différents utilisés par mois était bien inférieur au nombre total de véhicules différents utilisés sur toute la période d'étude (23,9 véhicules différents par mois en moyenne pour la compagnie 1, avec un maximum de 33 véhicules en septembre 2017, contre 43 véhicules dans la flotte totale ; 19,7 véhicules différents par mois en moyenne pour la compagnie 2, avec un maximum de 30 véhicules en janvier et février 2016, contre 56 dans la flotte totale). Cela est cohérent avec la durée de vie moyenne de ces véhicules (2 à 3 ans), qui implique un renouvellement important chaque année de 30 à 50 % de la flotte, selon les responsables des compagnies.

Il ressort au travers de ces analyses temporelles que l'activité des compagnies a été fortement perturbée au cours de l'épizootie. Ces résultats sont cohérents avec une étude conjointe réalisée sur ce même réseau de transport (Bauzile et al. 2021).

### **3) Contribution des mouvements de véhicules à l'épizootie**

Le but de cette partie était dans un premier temps d'étudier l'effet significatif global des mouvements de véhicules sur l'épizootie (ont-ils contribué à la dissémination du virus), effet étudié via le test statistique. Dans un second temps, si ce rôle était démontré, le but était de le quantifier et d'évaluer son importance au moyen de l'étude des connexions à risque, et du calcul d'indices.

### A) Test statistique

Le nombre de connexions à risque calculé pour tous les réseaux (TN, AIN et TNs) sur l'ensemble de l'épizootie était statistiquement significativement plus élevé que le nombre moyen de connexions à risque dans les réseaux aléatoirement générés pour un intervalle de 14 jours. Cela suggère un rôle probable des mouvements de véhicule dans la diffusion du virus.

Il est intéressant de noter que ce phénomène s'observe aussi bien sur l'AIN que sur le TNs : ainsi les deux modes de diffusion peuvent être mis en cause par cette étude. Concernant l'AIN, cela permet d'illustrer le fait que les transferts d'animaux entre élevages sont un risque pour la diffusion du virus. Des résultats similaires sont montrés dans des études sur des réseaux d'échanges d'animaux (Bouchez-Zacria et al. 2018 ; Claire Guinat et al. 2020).

Concernant le TNs, le transport passif du virus par les véhicules se trouve être fortement possible au vu des résultats. Des auteurs ont obtenu des résultats incriminant cette voie de transmission pour une autre maladie en utilisant une construction de réseau proche de la nôtre (Porphyre et al. 2020).

Cela peut s'expliquer d'une part par des mesures de biosécurité mal appliquées - une étude sur une contamination expérimentale d'un camion de transport a mis en évidence le risque élevé représenté par une désinfection mal réalisée : la plupart des désinfectants usuels sont efficaces contre le virus (De Benedictis et al. 2007 ; Shahid et al. 2009), mais ce sont surtout des lacunes au moment du nettoyage et de l'application sur l'ensemble des surfaces contaminées qui sont à risque (Krishna K. Thakur 2017) - et d'autre part par la nature même des réseaux de transport, dont la densité et la capacité à relier de nombreux élevages est un facteur de risque pour la diffusion de tout type d'agent pathogène, comme illustré dans plusieurs études (Augusta et al 2019 ; Salines et al. 2017; Thakur et al. 2016).

Ces deux risques ont été démontrés pour l'épizootie de 2016/2017. Des résultats d'inspections en élevage réalisées sur la période 2016-2018, au niveau national et régional, ont mis en évidence une inadéquation des mesures adaptées pour le nettoyage et la désinfection des véhicules pour 8,63 à 12,17 % des élevages étudiés (Delpont et al. 2018 ; Jouglu 2019 ; Payot 2019). Les non-conformités les plus récurrentes sont l'absence de matériel de nettoyage/désinfection ou de zone dédiée à ce nettoyage. Ensuite, l'étude conjointe menée sur le réseau TN par Bauzile et al. a démontré que ce réseau avait un fort potentiel de clustering : en moyenne, 1 élevage est relié à 25 autres élevages via le réseau, ce qui augmente le risque de dissémination du virus (Bauzile et al. 2021).



La lutte contre la propagation du virus passe donc ainsi par le renforcement des mesures de biosécurité, et la mise aux normes de tous les élevages en cette matière. Les études évoquées couvrent en partie une période datant d'avant l'épizootie. Il serait intéressant de redresser le bilan des inspections réalisées les années suivant l'épizootie pour voir si les mesures de biosécurité ont évolué positivement.

En s'intéressant ensuite à l'effet mois, il apparaît que les p-values calculées étaient en majorité inférieures à 0.05 pour les mois de novembre 2016, décembre 2016 et février 2017. A contrario elles n'étaient jamais nulles en janvier 2017 et toujours égales à 1 en mars 2017, ce qui signifie que l'hypothèse d'une diffusion par le réseau de transport pendant ce mois-ci peut être rejetée.

Au vu de ces résultats, il est possible d'imaginer que les mesures de restrictions sur les déplacements, mises en place en début d'épizootie (DGA 2017), ont été efficace : le nombre de connexions à risque en 2016, au début de l'épizootie est bien plus élevé que pour les mois de janvier et mars 2017 cumulés, une fois les mesures mises en place. Cependant se retrouve au milieu un mois de février 2017 à six connexions à risque, toutes le même jour (17/02/2017), et liées à deux tournées de type PGG, qui pourraient être considérées comme un accident au milieu des mesures de restriction. De plus, il est possible d'observer un biais lors de ces connexions ayant toutes lieu au sein d'une même tournée : on peut fortement suspecter le PAG d'avoir envoyé des animaux infectés aux deux GAV (créant ainsi deux connexions à risque). Cependant il n'existerait alors pas de transmission passive entre les deux GAV ; or notre algorithme comptera cette connexion comme aussi à risque, et faussera de ce fait les analyses et nos interprétations.

#### B) Description des connexions à risque

La répartition géographique des connexions à risque permet d'illustrer ce phénomène temporel, et de mettre en valeur les deux tournées « incriminées » dans les connexions à risque de février 2017. Ces connexions à risque ont eu lieu sur de plus ou moins grandes distances, parfois entre deux départements, ce qui représente un risque de dissémination à moyenne échelle du virus. Il est également possible, au vu des dates des connexions à risque, de retracer l'avancer du virus au-cours de l'épizootie, partant du nord-est pour s'étaler vers le sud et l'ouest, un pattern de migration cohérent avec celui observé par Guinat et al (Guinat et al. 2018). Dans cette même étude, les auteurs identifient 5 probables cluster lors de l'épizootie, en utilisant un test statistique de permutation des données spatio-temporelles proposé par Kulldorff et al (Kulldorff et al. 2009). Ces clusters sont représentés en Figure 24.

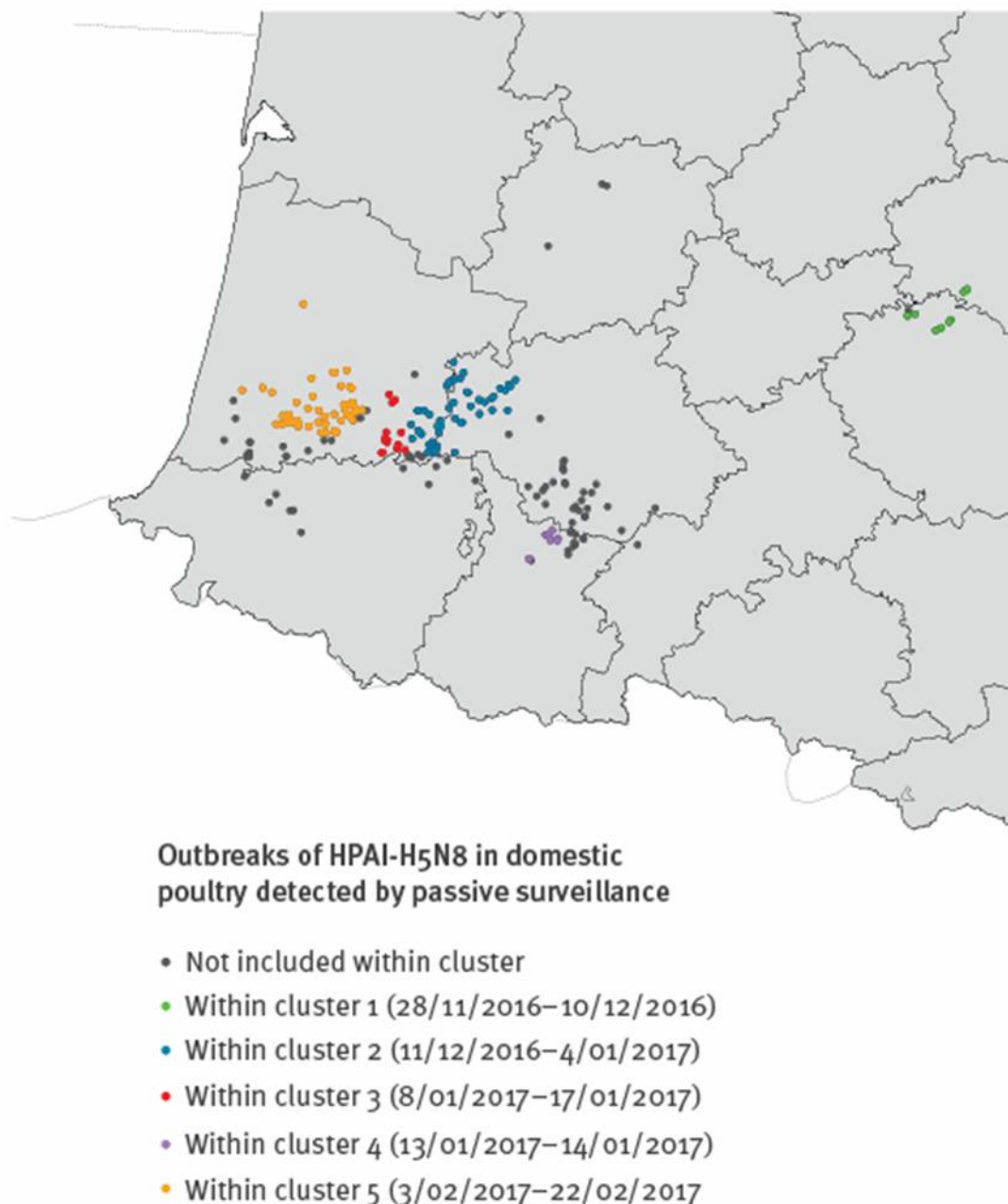


Figure 23 : Localisation géographique des clusters les plus probables détectés par le test de permutation des données spatio-temporelles (Guinat et al. 2018)

Les auteurs n'ont conservé pour ce test que les élevages ayant déclaré un foyer à la suite de la surveillance passive (i.e. après suspicion clinique dans l'élevage). Les élevages ayant déclaré un foyer à la suite de la surveillance active (tests réalisés dans des élevages situés dans un rayon de 3 km d'un foyer déclaré) sont exclus de l'étude. Il est intéressant de noter que plusieurs des connexions à risque se situent quelques jours avant (connexions du 02 et 09 décembre avec le

cluster 2) ou pendant (connexions du 17 février dans les Landes avec le cluster 5) un cluster, et auraient pu être la cause de l'apparition du virus dans un territoire donné avant sa diffusion rapide au voisinage.

### C) Calculs d'indices

Le nombre de connexions à risque et d'élevage impliqués est relativement faible par rapport à la totalité des connexions et des élevages (0,95 % des connexions totales sont à risque pour une fenêtre de 14 jours et 4,8 % des élevages ayant déclaré un foyer ont pu voir le virus être introduit par les mouvements de véhicules), ce qui est probablement dû au fait que dans la très grande majorité des cas, les protocoles de biosécurité sont parfaitement respectés, ou dû aux mesures précoces mises en place pour limiter les déplacements.

La mise en place de ces restrictions apparaît justifiée en regard des forts risques de transmission calculés : la moitié des foyers d'où sont partis des mouvements de véhicule dans les 14 jours précédant la date de suspicion aurait pu contaminer d'autres élevages via ces mouvements.

Ce nombre augmente même à deux-tiers (66 % - 4/6) si on ne considère que les élevages ayant envoyé des animaux dans les 14 jours précédant leur date de suspicion. Un taux de transmission aussi élevé apparaît logique : il est fort probable que le virus soit déjà présent dans l'élevage de départ, en phase d'incubation, au moment du transfert, ce qui amène à transférer des animaux malades dans l'élevage d'arrivée.

Plus inquiétant, ce taux reste élevé, même si on ne considère que les connexions entre élevages uniquement par le camion (TNs – 46,2 %). Cela signifie que les véhicules ont de fortes chances de transporter le virus d'un élevage à un autre.

Une des mesures possibles pour réduire l'impact des mouvements de véhicules sur la dissémination du virus serait de supprimer toutes les connexions indirectes entre élevages (tout le TNs en somme), c'est-à-dire de ne plus faire que des tournées de type PG, avec un seul PAG envoyant ses animaux à un seul GAV. Une mesure similaire avait été prise aux Pays-Bas lors de l'épizootie de peste porcine classique de 1997/1998 (Stegeman et al. 2000). Cependant cette mesure implique une refonte radicale de la structure et de l'organisation des réseaux de transports actuels, et implique un investissement important de la part des compagnies de transport, c'est pourquoi des études plus approfondies sont nécessaires avant d'évoquer de telles mesures.

Une autre mesure serait d'identifier les élevages les plus connectés aux autres au sein du réseau, et de focaliser les mesures restrictives sur eux pour fragmenter au maximum le réseau en affectant un minimum d'élevage, et ainsi contenir la propagation du virus. De telles mesures ont été prouvées efficaces expérimentalement (Rautureau et al.2011). Les éleveurs possédant une activité mixte (PAG/GAV) semblent être les plus indiqués pour appliquer ces mesures, car ce sont ceux générant le plus d'échanges et de mouvements vers et depuis d'autres fermes.

#### **4) Limites de l'étude**

##### **A) Le manque de données**

Le jeu de donnée utilisé dans ces analyses aurait gagné à être agrandi, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, nous n'avions pas les données de transport correspondant à la période précédant l'épizootie pour la compagnie 1. Il aurait été intéressant de comparer cette période à la période postérieure à l'épizootie, pour vérifier si les importantes variations observées début 2017 résultent bien des perturbations liées à l'épizootie.

Ensuite, au-travers d'analyses de comparaison avec un jeu de donnée fournies par le CIFOG et décrit en Annexe 3, il apparaît que les données issues des bases transporteurs ne représentent qu'une partie de la totalité des échanges ayant eu lieu pendant l'épizootie, car il existe d'autres compagnies de transport, pour lesquels nous n'avons pu obtenir les données. Ce « manque » de donnée signifie que les réseaux peuvent être incomplet, et pas forcément représentatifs de la situation réelle, car nous ne pouvons être certain que la population d'éleveur ayant eu recours aux services des deux compagnies étudiées (l'échantillon de population) est totalement représentative de la population totale des éleveurs du sud-ouest (population source) (Dohoo et al. 2014). Par exemple, il nous manque une partie significative des échanges effectués dans le département des Landes (environ 50 % des échanges chaque mois), alors que ce fut le département le plus largement touché (presque 300 cas déclarés), ce qui signifie que nous avons pu passer à côté d'un certain nombre de foyers. Nous pourrions aussi supposer que les transporteurs ne travaillent qu'avec des élevages de plus ou moins grande taille ; les très petits élevages, qui ont pu être touché différemment par la maladie du fait de leur structure différente, ne seraient ainsi pas représentés dans cette étude. De la même façon, nous ne pouvons savoir si les élevages faisant appel à des transporteurs n'ont pas des caractéristiques propres (élevages plus ou moins consciencieux vis-à-vis de la biosécurité, plus ou moins d'élevages mixtes...). De nombreux biais peuvent ainsi être imaginés.

Cependant, la proportion d'éleveur ayant déclaré un foyer enregistré chez les compagnies sur le nombre total d'éleveurs ayant déclaré un foyer (47,5 % - 230/484) était similaire à la proportion de transferts enregistrés dans les bases des deux compagnies sur le nombre de transferts enregistrés par le CIFOG, qui recense l'ensemble des transferts dans le bassin du sud-ouest (45 %). Cela signifie que la population d'éleveur dans notre étude semble avoir été touchée dans les mêmes grandeurs que la population totale des éleveurs du sud-ouest ; nous l'avons donc considérée comme représentative pour étudier la propagation du virus.

Se pose ensuite la question de savoir si nos analyses, notamment le k-test, restent pertinentes sur un réseau incomplet. Ce cas de figure a été exploré par VanderWaal et al. dans leur étude (VanderWaal et al. 2016) : ils ont testé le k-test sur un réseau complet, puis sur le même réseau en enlevant aléatoirement des connexions. Les résultats sont restés concluant : sur un réseau où manquent 25% des connexions, ils ont obtenu des valeurs similaires au réseau complet. Sur un réseau où manquent 50% des connexions, la performance du test commence à diminuer, mais le test reste sensible. Cela prouve la robustesse du test et justifie son utilisation dans le cadre de notre étude.

Il serait néanmoins utile de reconduire des études menées sur un jeu de donnée complet, représentatif des transports réalisés, sur l'épizootie de 2020-2021 par exemple, pour s'abstraire de ces biais.

On suppose enfin que du fait du manque de données, un certain nombre de mouvements à risque ont pu être occulté dans les réseaux par rapport à la réalité. Par exemple, des connexions à risque ont été détecté en étudiant les données du CIFOG sur les introduction d'animaux, entre un élevage du Tarn (où la maladie s'est déclaré la première en France) et plusieurs élevages du Lot-et-Garonne, du Gers et des Hautes-Pyrénées (Guinat et al. 2020).

La taille limitée du jeu de donnée, due aux phénomènes expliqués ci-dessus, mais aussi due pour certains mois au fait que l'activité de transport était réduite voir quasi-nulle, représente aussi un problème en termes d'analyses statistiques : il est par exemple difficile de comparer deux mois où le nombre de tournées est très faible, sans biais. Par exemple, au mois de juillet 2016, le nombre de tournées était très bas (neuf) ; ainsi pour chaque paramètre étudié, la moyenne est beaucoup plus sensible à des valeurs extrêmes, ce qui est le cas ici pour la distance de tournée (deux tournées de plus de 300 km ont eu lieu). Ce phénomène est objectivé par la valeur extrêmement élevée du 75<sup>e</sup> centile sur le graphique pour ce mois-ci par rapport aux autres mois étudiés.

### B) La fenêtre d'intervalle pour la définition d'une connexion à risque

Pour la définition d'une connexion à risque, nous avons fait le choix de prendre une valeur de 14 jours entre les dates de suspicions d'infection par le virus dans les élevages et la date de la connexion. Il était intéressant d'essayer des fenêtres de contamination de taille différentes pour tester la robustesse du réseau et la pertinence de nos analyses, car la durée d'incubation du virus n'est pas une valeur fixe, mais peut s'étaler entre 1 et 5 jours à l'échelle individuelle (Pantin-Jackwood et al. 2016). Cependant, à l'échelle d'un troupeau, selon la dynamique de contamination, il peut se passer plusieurs jours avant qu'une partie significative des animaux soit atteints pour que l'éleveur détecte les premiers signes cliniques. C'est pourquoi l'OIE recommande d'utiliser une période d'incubation de 2 à 3 semaines pour les études à l'échelle d'un troupeau (Swayne 2008a).

Nous avons réalisé le test statistique sur les mêmes variables avec une fenêtre plus étroite (7 jours). Les distributions des connexions à risque obtenues sous l'hypothèse nulle et sur les réseaux réels pour cette fenêtre figurent en Annexe 2. Il ressort que même avec une fenêtre étroite, le nombre de connexions à risque dans les réseaux réels est statistiquement significativement supérieur à la distribution des connexions à risques obtenues sous l'hypothèse nulle, et la p-value est inférieure à 0.05 pour le réseau TN, sur l'ensemble de l'épizootie et mois par mois (sauf en mars 2017). Ainsi, même avec une fenêtre de transmission étroite, le rôle des mouvements de véhicules dans la dissémination du virus ne peut être écarté.

### C) Interaction avec d'autres voies de transmission

Dans cette étude, nous considérons que les élevages ne sont liés que par les mouvements de véhicules de transport ; ainsi chaque connexion à risque est considérée comme un mouvement infectant, car c'est le seul lien identifiable entre deux foyers rapprochés dans le temps. Cependant les élevages peuvent partager d'autres liens : proximités géographique, partage de matériel, mouvements de véhicules d'équarrissage, vétérinaires, de commerce... Ainsi, deux foyers reliés par un mouvement de véhicule ont pu se déclarer simultanément du fait d'une autre voie, et la comptabilisation du mouvement de véhicule de transport comme mouvement infectant serait une erreur. Il serait intéressant de reconduire des études tenant compte de chaque voie de transmission simultanément, pour ne pas attribuer à tort les infections.

## Conclusion

Au travers de cette étude, il apparaît que les mouvements de véhicules ont joué un rôle dans la dissémination du virus. Peu d'élevages semblent avoir été contaminés via cette voie ; cependant les rares mouvements partant d'un élevage quelque jours avant que l'on suspecte un foyer ont été dans de grandes proportions des mouvements infectants. Ces quelques mouvements de véhicules infectants ont eu lieu sur des distances plus ou moins élevées, et parfois sur deux départements : c'est une des raisons que l'on peut avancer pour expliquer le fait que l'épizootie de 2016/2017 ne s'est pas cantonnée à quelques élevages voisins, mais s'est au contraire étendue sur deux régions différentes. C'est le risque insidieux posé par cette voie de transmission : il y a de faibles probabilités de la voir survenir, mais les rares cas où cette voie est 'utilisée', les conséquences peuvent être désastreuses car le virus apparaît alors sur un nouveau territoire.

Les résultats de cette étude démontrent l'intérêt en particulier de se focaliser sur les mouvements de véhicules et leur portage passif, rôle qui a jusqu'ici été très peu étudié dans la littérature. Une attention particulière à la bonne mise en œuvre des mesures de biosécurité en élevage semble être la piste majeure pour combattre ce phénomène.

Les mesures mises en place pour restreindre les mouvements de véhicules sont une des raisons majeures pour laquelle ces mouvements de véhicules ne semblent représenter qu'une part marginale des infections ; elles ont en outre eu un impact vérifiable sur l'organisation des tournées et l'activité des compagnies de transport.

Si les mouvements de véhicules ne représentent finalement qu'une faible part des transmissions, il convient alors de se demander comment le virus a diffusé au cours de cette épizootie, et quels facteurs de risque peuvent être combattus. Des études sur la densité maximale d'élevages de canards, sur la refonte du système de transport, sur l'évolution des normes de biosécurité en élevage... pourraient permettre d'évaluer le risque global. Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour la création d'un modèle tenant en compte la contribution relative de chaque voie de transmission, et permettant de simuler ou prédire l'évolution d'une épizootie.

Le problème de l'influenza aviaire ne s'est malheureusement pas résolu après cette épizootie. Pendant l'hiver 2020/2021, une nouvelle crise a touché la France, et malgré des mesures restrictives et des abattages réalisés plus précocement (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt 2020), le nombre de foyers déclarés a dépassé l'épisode

2016/2017. La crainte de voir réapparaître le virus dans les années à venir est donc réelle, et les enjeux économiques et sociaux d'une compréhension rapide du mode de diffusion de ce virus n'en sont que plus importants.

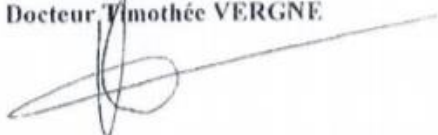


AGREMENT SCIENTIFIQUE

En vue de l'obtention du permis d'imprimer de la thèse de doctorat vétérinaire

Je soussigné, Timothée VERGNE, Enseignant-chercheur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de **SICARD Gabriel** intitulée  
« **Etude du réseau de transport de palmipèdes à foie gras dans le sud-ouest et du rôle joué par les mouvements de véhicules de transport dans la dissémination du virus de l'Influenza aviaire** » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.

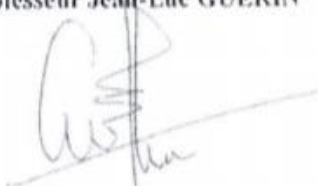
Fait à Toulouse, le 14/06/2021  
Enseignant-chercheur de l'Ecole Nationale  
Vétérinaire de Toulouse  
Docteur Timothée VERGNE



Vu :  
Le Directeur de l'Ecole Nationale  
Vétérinaire de Toulouse  
M. Pierre SANS



Vu :  
Le Président du jury  
Professeur Jean-Luc GUERIN



Vu et autorisation de l'impression :  
Le Président de l'Université Paul  
Sabatier  
Monsieur Jean-Marc BROTO  
Par délégation, le Doyen de la faculté de  
Médecine de Toulouse-Rangueil  
Monsieur Elie SERRANO



M. SICARD Gabriel  
a été admis sur concours en : 2016  
a obtenu son diplôme d'études fondamentales vétérinaires le: 06/07/2020  
a validé son année d'approfondissement le: 16/07/2021  
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.

## Références

AGRESTE. 2020. « Aviculture - Foie gras ». In “Graph’agri 2020 - L’agriculture, la forêt, la pêche et les industries agroalimentaires”. Ministère de l’Agriculture et de l’Alimentation Secrétariat général Service de la statistique et de la prospective. 172.

<https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/GraFra2020Integral/detail/>.

ALARCON P, BROUWER A, VENKATESH D, DUNCAN D, DOVAS CI, GEORGIADIS G, MONNE I, FUSARO A, DAN A, ŚMIETANKA K, RAGIAS V, BREED AC, CHASSALEVRIS T, GOUGOULOVA G, HJULSAGER CK, RYAN E, SÁNCHEZ A, NIQUEUX E, TAMMIRANTA N, ZOHARI S, STROUD DA, SAVIĆ V, LEWIS NS, BROWN IH. 2018. « Comparison of 2016–17 and Previous Epizootics of Highly Pathogenic Avian Influenza H5 Guangdong Lineage in Europe ». *Emerging Infectious Diseases* 24(12): 2270-2283.

AUGUSTA C, GRAHAM GW, DEARDON R. 2019. « Dynamic Contact Networks of Swine Movement in Manitoba, Canada: Characterization and Implications for Infectious Disease Spread ». *Transboundary and Emerging Diseases* 66(5): 1910-19.

BAUZILE B. 2021. « Unravelling direct and indirect contact patterns of french duck farms using multilayer network analyses ». *titre provisoire – étude conjointe à la note, à paraître en 2021*

BERNINI A, BOLZONI L, CASAGRANDE R. 2019. « When Resolution Does Matter: Modelling Indirect Contacts in Dairy Farms at Different Levels of Detail ». *PLOS ONE* 14(10): e0223652.

BOUCHEZ-ZACRIA M, COURCOUL A, DURAND B. 2018. « The Distribution of Bovine Tuberculosis in Cattle Farms Is Linked to Cattle Trade and Badger-Mediated Contact Networks in South-Western France, 2007–2015 ». *Frontiers in Veterinary Science* 5. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fvets.2018.00173/full> (20 avril 2021).

BRONNER A, NIQUEUX E, SCHMITZ A, LE BOUQUIN S, HUNEAU-SALAÜN A, GUINAT C, PAUL M, COURCOUL A, DURAND B. 2017. « Description de l’épisode d’influenza aviaire hautement pathogène en France en 2016-2017 ».

CAUCHARD J, MERCIER A, FALALA S, VAN DE WIEL A, GUILLEMAIN N, BRONNER A, CALAVAS D. 2017. « Episode d’influenza aviaire hautement pathogène en

Europe en 2016-2017 ». Bulletin Epidémiologique. <https://agritrop.cirad.fr/586407/> (29 avril 2021).

CHOI J, TORREMORELL M, BENDER JB, SMITH K, BOXRUD D, ERTL JR, YANG M, SUWANNAKARN K, HER D, NGUYEN J, UYEKI TM, LEVINE M, LINDSTROM S, KATZ JM, JHUNG M, VETTER S, WONG KK, SREEVATSAN S, LYNFIELD R. 2015. « Live Animal Markets in Minnesota: A Potential Source for Emergence of Novel Influenza A Viruses and Interspecies Transmission ». Clinical Infectious Diseases: An Official Publication of the Infectious Diseases Society of America 61(9): 1355-62.

CIFOG, ITAVI. 2016. « Guide de bonnes pratiques d'hygiène et d'application des principes de biosécurité lors des opérations de transport pour la filière palmipède à foie gras ».

DE BENEDICTIS P, BEATO MS, CAPUA I. 2007. « Inactivation of Avian Influenza Viruses by Chemical Agents and Physical Conditions: A Review ». Zoonoses and Public Health 54(2): 51-68.

DEE SA, DEEN J, OTAKE S, PIJOAN C. 2004. « An experimental model to evaluate the role of transport vehicles as a source of transmission of porcine reproductive and respiratory syndrome virus to susceptible pigs ». Canadian Journal of Veterinary Research 68(2): 128-33.

DELPONT M, BLONDEL V, ROBERTET L, DURET H, GUERIN JL, VAILLANCOURT JP, PAUL M. 2018. « Biosecurity Practices on Foie Gras Duck Farms, Southwest France ». Preventive Veterinary Medicine 158: 78-88.

DGAL. 2016. « Modalités de levée de la zone de restriction dans le cadre de la lutte contre l'influenza aviaire en France ». Instruction technique 2016-596.

DGAL. 2017. « Mesures applicables suite à une suspicion ou à la mise en évidence de foyer IAHP en France ». Instruction technique 2017-478.

DGAL. 2018. « Modalité de mise en place et d'inspection des mesures de biosécurité dans les transports par véhicules routiers d'oiseaux vivants ». Instruction technique 2018-207.

DIRECTION RÉGIONALE DE L'ALIMENTATION, DE L'AGRICULTURE ET DE LA FORÊT NOUVELLE-AQUITAINE. 2017. « Fiche technique de la filière palmipède gras ». <https://draaf.nouvelle-aquitaine.agriculture.gouv.fr/Fiche-filiere-palmipedes-gras-Mise>.

- DOHOO I, WAYNE M, HENRIK S. 2014. Veterinary Epidemiologic Research. 2e éd.
- ENITA. 1993. « Palmipèdes à foie gras ». In “Productions animales” .111-28.
- FÈVRE EM, BRONSVOORT BMC, HAMILTON KA, Cleaveland S. 2006. « Animal Movements and the Spread of Infectious Diseases ». Trends in Microbiology 14(3): 125-31.
- GREEN DM, KISS IZ, KAO RR. 2006. « Modelling the initial spread of foot-and-mouth disease through animal movements ». Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 273(1602): 2729-35.
- GUINAT C, NICOLAS G, VERGNE T, BRONNER A, DURAND B, COURCOUL A, GILBERT M, GUERIN JL, PAUL M. 2018. « Spatio-Temporal Patterns of Highly Pathogenic Avian Influenza Virus Subtype H5N8 Spread, France, 2016 to 2017 ». Eurosurveillance 23(26): 1700791.
- GUINAT C, ARTOIS J, BRONNER A, GUERIN JL, GILBERT M, PAUL M. 2019. « Duck Production Systems and Highly Pathogenic Avian Influenza H5N8 in France, 2016–2017 ». Scientific Reports 9(1): 6177.
- GUINAT C, DURAND B, VERGNE T, CORRE T, RAUTUREAU S, SCOIZEC A, LEBOUQUIN S, GUERIN JL, PAUL M. 2020. « Role of Live-Duck Movement Networks in Transmission of Avian Influenza, France, 2016–2017 ». Emerging Infectious Diseases 26(3): 472-80.
- HAY KE, BARNES TS, MORTON JM, CLEMENTS ACA, MAHONY TJ. 2014. « Risk Factors for Bovine Respiratory Disease in Australian Feedlot Cattle: Use of a Causal Diagram-Informed Approach to Estimate Effects of Animal Mixing and Movements before Feedlot Entry ». Preventive Veterinary Medicine 117(1): 160-69.
- HERCULE J, LALAURETTE C. 2019. « Impact économique des épizooties d’influenza aviaire sur la filière palmipède à foie gras ».
- JOUGLA D. 2019. « Evaluation des pratiques de biosécurité en filière avicole dans le département des Landes dans le contexte des crises d’influenza ». other. <https://oatao.univ-toulouse.fr/25826/> (6 mai 2021).
- KULLDORFF M, HUANG L, KONTY K. 2009. « A scan statistic for continuous data based on the normal probability model ». International Journal of Health Geographics 8(1): 58.

MICROSOFT CORPORATION. 2018. Microsoft Excel [Internet]. Available from:  
<https://office.microsoft.com/excel>.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT.  
2017. « Arrêté du 31 mars 2017 déterminant des dispositions de prévention, de surveillance et  
lutte complémentaires contre l'influenza aviaire hautement pathogène dans certaines parties  
du territoire. AGRG1710381A ».

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT.  
2020. « Arrêté du 23 décembre 2020 définissant les zones géographiques dans lesquelles un  
abattage préventif est ordonné en application de l'arrêté du 4 janvier 2017 relatif aux mesures  
complémentaires techniques et financières pour la maîtrise de l'épizootie d'influenza aviaire  
due au virus H5N8 dans certains départements - Légifrance ».

<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000042731469> (14 juin 2021).

NAPP S, MAJÓ N, SÁNCHEZ-GÓNZALEZ, R, VERGARA-ALERT J. 2018. « Emergence  
and Spread of Highly Pathogenic Avian Influenza A(H5N8) in Europe in 2016-2017 ». *Transboundary and Emerging Diseases* 65(5): 1217-26.

OLSEN B, MUNSTER VJ, WALLENSTEN A, WALDENSTRÖM J, OSTERHAUS AD,  
FOUCHIER RAM. 2006. « Global Patterns of Influenza A Virus in Wild Birds ». *Science*  
312(5772): 384-88.

PANTIN-JACKWOOD MJ, COSTA-HURTADO M, SHEPHERD Z, DEJESUS E, SMITH  
D, SPACKMAN, E KAPCZYNSKI DR, SUAREZ DL, STALLKNECHT DE, SWAYNE  
DE. 2016. « Pathogenicity and Transmission of H5 and H7 Highly Pathogenic Avian  
Influenza Viruses in Mallards ». *Journal of Virology* 90(21): 9967-82.

PAYOT A. 2019. « Pratiques de biosécurité en élevage avicole : analyse des bilans  
d'inspection à l'échelle nationale (2016-2018) ». other. <https://oatao.univ-toulouse.fr/25666/>  
(6 mai 2021).

PINGEL H, GUY G, BAÉZA E. 2012. « Production de foie gras ». In *Production de canards*,  
Quae, 197-210.

PORPHYRE T, BRONSVOORT BMC, GUNN GJ, CORREIA-GOMES C. 2020. «  
Multilayer Network Analysis Unravels Haulage Vehicles as a Hidden Threat to the British  
Swine Industry ». *Transboundary and Emerging Diseases* 67(3): 1231-46.

- R CORE TEAM. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RAUTUREAU S, DUFOUR B, DURAND B. 2011. « Vulnerability of Animal Trade Networks to The Spread of Infectious Diseases: A Methodological Approach Applied to Evaluation and Emergency Control Strategies in Cattle, France, 2005 ». *Transboundary and Emerging Diseases* 58(2): 110-20.
- SALINES M, ANDRAUD M, ROSE N. 2017. « Pig Movements in France: Designing Network Models Fitting the Transmission Route of Pathogens ». *PLOS ONE* 12(10): e0185858.
- SCOIZEC A, NIQUEUX E, THOMAS R, DANIEL P, SCHMITZ A, LE BOUQUIN S. 2018. « Airborne Detection of H5N8 Highly Pathogenic Avian Influenza Virus Genome in Poultry Farms, France ». *Frontiers in Veterinary Science* 5.  
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fvets.2018.00015/full> (6 mai 2021).
- SHAHID MA, ABUBAKAR M, HAMEED S, HASSAN S. 2009. « Avian influenza virus (H5N1); effects of physico-chemical factors on its survival ». *Virology Journal* 6(1): 38.
- SOARES MAGALHÃES RJ, ORTIZ-PELAES A, THI KLL, DINH QH, OTTE J, PFEIFFER DU. 2010. « Associations between attributes of live poultry trade and HPAI H5N1 outbreaks: a descriptive and network analysis study in northern Vietnam ». *BMC Veterinary Research* 6(1): 10.
- SPICKLER A. 2016. « Highly Pathogenic Avian Influenza ». 38.
- SSEMATIMBA, A, ELBERS ARW, HAGENAARS TJ, DE JONG MCM. 2012. « Estimating the Per-Contact Probability of Infection by Highly Pathogenic Avian Influenza (H7N7) Virus during the 2003 Epidemic in The Netherlands ». *PLOS ONE* 7(7): e40929.
- STALLKNECHT DE, BROWN JD. 2009. « Tenacity of avian influenza viruses ». 28(1): 59.
- STEGEMAN ARJAN, ELBERS A, DE SMIT H, MOSER H, SMAK J, PLUIMERS F. 2000. « The 1997–1998 Epidemic of Classical Swine Fever in the Netherlands ». *Veterinary Microbiology* 73(2): 183-96.
- SWAYNE DE. 2008a. « Avian Influenza ». In *Foreign animal diseases*, United States Animal Health Association, 137-46.

- SWAYNE DE. 2008b. « Epidemiology of avian influenza in agricultural and other man-made systems ». In *Avian Influenza*, Ames, Iowa: Blackwell Publishing, 59-85.
- THAKUR KK, REVIE CW, HURNIK D, POLJAK Z, SANCHEZ J. 2016. « Analysis of Swine Movement in Four Canadian Regions: Network Structure and Implications for Disease Spread ». *Transboundary and Emerging Diseases* 63(1): e14-26.
- THAKUR KK. 2017. « Modelling contamination of trucks used in the shipment of pigs infected with porcine reproductive and respiratory syndrome virus ». *Journal of Swine Health and Production* 25(4): 183-93.
- VANDERWAAL K ENNS EA, PICASSO C, PACKER C, CRAFT ME. 2016. « Evaluating empirical contact networks as potential transmission pathways for infectious diseases ». *Journal of The Royal Society Interface* 13(121): 20160166.
- VUILLAUME A, BANON H. 1988. « La production de palmipède et de foies gras ». In *L'aviculture française*. 287-96.
- WEBSTER R G, BEAN WJ, GORMAN OT, CHAMBER TN, KAWAOKA Y. 1992. « Evolution and ecology of influenza A viruses. » *Microbiological Reviews* 56(1): 152-79.
- WOOD JP, CHOI YW, CHAPPIE DJ, ROGERS JV, KAYE JZ. 2010. « Environmental Persistence of a Highly Pathogenic Avian Influenza (H5N1) Virus ». *Environmental Science & Technology* 44(19): 7515-20.



# Annexes

## Annexe 1 : Exemple des structures de base

### 1) La base éleveur

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	NOM	SIRET	TYPE	OP	COMMUNE	INSEE	LONG (WGS)	LAT (WGS)	LONG (L93)	LAT (L93)	SUSPI	CONFIRM
2	ELEVEUR1	40876003460	PAG	PALMITOU	ILHARRE	64272	43,8195988	-0,90507187	495006,911	623987,579		
3	ELEVEUR2	28097432782	PAG	PALMITOU	GABAT	64228	44,3436631	0,64152384	491794,884	624164,268		
4	ELEVEUR3	55485819483	PAG	EURALIS CERÉ	OGENNE CAM	64420	43,7986866	0,94935414	525128,138	623831,867		
5	ELEVEUR4	32575597433	GAV	PALMITOU	ARCANGUES	64038	44,837146	0,8909809	408272,357	624233,521		
6	ELEVEUR5	76420853291	GAV	EURALIS CERÉ	SAINT VINCE	64498	44,9599606	-1,00187807	464416,081	626503,553		
7	ELEVEUR6	08380760516	PAG	LES CANARDS	AUX AUSSAT	32020	44,8192747	0,77029178	401080,25	628174,35		
8	ELEVEUR7	86732260967	PAG	DIVERS DAUG	MONTAUT	40191	44,8287388	-0,50289931	397054,719	637592,707		
9	ELEVEUR8	24502047717	PAG	EURALIS CERÉ	ARMENDARIT	64046	44,7588364	-0,84551413	358442,545	635586,842		
10	ELEVEUR9	45521220914	GAV	EURALIS CERÉ	SAINT PAUL	65394	44,1665656	-0,33540761	365679,364	627797,719		
11	ELEVEUR10	36689152916	GAV	LES CANARDS	LABARRERE	32168	43,0185561	-1,46832873	484602,386	623443,304		
12	ELEVEUR11	02709253220	GAV	AGROPALM	VILLEFRANCH	47320	43,3901655	-1,94128873	451798,51	631516,022	27/02/2017	02/03/2017
13	ELEVEUR12	22546045602	PAG	EURALIS CERÉ	SUHESCUN	64528	44,6000358	-1,30402559	479462,662	634700,6		
14	ELEVEUR13	38066914318	GAV	PALMITOU	ARTIGUELOU	64059	43,0111365	0,7087365	447677,134	626528,247	21/02/2017	27/02/2017
15	ELEVEUR14	37355405380	MIXTE	EURALIS CERÉ	LAY LAMIDOL	64326	43,9703386	-1,12754454	471682,116	631391,854		
16	ELEVEUR15	01650913103	GAV	PALMITOU	MASPARRAUT	64368	44,8966311	-0,72072004	386782,268	635704,143		
17	ELEVEUR16	97700734658	PAG	DIVERS DAUG	CASTELNAUD	47055	43,5692754	0,77590025	435157,536	637181,204		
18	ELEVEUR17	92418905232	PAG	EURALIS CERÉ	BARDOS	64094	44,8767705	-0,48451019	500084,555	630116,795		
19	ELEVEUR18	03277076096	MIXTE	DIVERS DAUG	SAINT JEAN LI	64484	44,1588936	-1,32461537	388118,613	632403,643		
20	ELEVEUR19	70211921243	MIXTE	EURALIS CERÉ	PRECHACQ N	64459	44,6186674	0,28845474	377224,351	634227,247		
21	ELEVEUR20	63532111931	GAV	EURALIS CERÉ	LASSALES	65266	44,296365	0,86715695	480872,13	632138,889		
22	ELEVEUR21	85127574863	PAG	PALMITOU	SAINT AVIT	40250	44,4082477	-0,3389593	363486,688	637558,89		
23	ELEVEUR22	47983615435	PAG	AGROPALM	BARCELONNE	32027	44,699351	-0,32171298	360540,797	632113,256		
24	ELEVEUR23	20287167846	GAV	AGROPALM	ENGAYRAC	47087	43,0588213	-1,31520489	377691,041	631694,115		
25	ELEVEUR24	73137929456	GAV	PALMITOU	MENDIONDE	64377	44,7870724	0,72992731	368293,431	631689,781		
26	ELEVEUR25	47444356040	GAV	LES CANARDS	CLAIRAC	47065	43,5960685	0,5025826	423999,12	623974,1		
27	ELEVEUR26	79391173169	PAG	PALMITOU	CLASSUN	40082	43,3235387	-0,99942391	469062,402	623076,508		
28	ELEVEUR27	96589889498	GAV	EURALIS CERÉ	CAUVIGNAC	33113	44,9584675	0,90541098	383940,181	627617,327		
29	ELEVEUR28	96475368558	PAG	LES CANARDS	BEAUMARCHI	32036	44,2084486	-0,62646733	505084,568	625588,379		

NOM : nom de l'élevage ; SIRET : numéro de SIRET de l'élevage ; TYPE : type d'activité pratiqué par l'élevage (PAG, GAV ou mixte) ; OP : organisme de production affilié à l'élevage ; COMMUNE : commune d'enregistrement de l'élevage ; INSEE : code INSEE de la commune ; LONG : longitude ; LAT : latitude ; WGS : World Geodetic System ; L93 : Lambert 93 ; SUSPI : date de suspicion d'un foyer d'influenza aviaire dans l'élevage ; CONFIRM : date de confirmation d'un foyer d'influenza aviaire dans l'élevage

*Pour des raisons de confidentialité, les noms d'éleveurs ont été remplacé par un terme générique (ELEVEURn), et les numéros de SIRET et coordonnées géographiques ont été générés aléatoirement.*



## 2) La base tournée

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	DATE	IMM	OP	DISTANCE	CHARG	DECHARG	TRAJETS	DPT	PAG	GAV	TYPE_TOUR
2	07/01/2017	EP819YB	LES CANARDS	116,937658	1688	844	2	3	1	2	PGG
3	09/01/2017	AO069EI	LES CANARDS	40,2368785	546	546	1	2	1	1	PG
4	09/01/2017	HA290QD	LES CANARDS	40,2368785	974	969	1	2	1	1	PG
5	12/01/2017	NM029QA	LES CANARDS	46,2866322	1500	1500	1	2	1	1	PG
6	12/01/2017	HS797LN	LES CANARDS	184,45989	2416	1206	2	2	1	2	PGG
7	12/01/2017	AX240SK	LES CANARDS	115,920488	1800	900	2	3	1	2	PGG
8	13/01/2017	JB518YW	AVISERVICES	5,83921532	1176	1176	1	1	1	1	PG
9	17/01/2017	FO824ZI	EURALIS CERE	59,2937747	936	936	1	1	1	1	PG
10	17/01/2017	PT539OQ	EURALIS CERE	147,938288	1448	1448	1	2	1	1	PG
11	17/01/2017	PU024YK	EURALIS CERE	144,22388	1231	1231	1	2	1	1	PG
12	17/01/2017	YI738WW	EURALIS CERE	174,214513	769	769	1	2	1	1	PG
13	17/01/2017	YV175BV	EURALIS CERE	47,6697026	1514	757	2	1	1	2	PGG
14	17/01/2017	DN123RX	EURALIS CERE	185,20571	1246	623	2	3	1	2	PGG
15	19/01/2017	BB729VT	AGROPALM	57,0555574	2688	2673	1	1	1	1	PG
16	19/01/2017	LN518TD	EURALIS CERE	21,0140956	1620	1620	1	1	1	1	PG
17	19/01/2017	RI117CU	EURALIS CERE	28,0186527	1002	1000	1	1	1	1	PG
18	19/01/2017	ES550XN	EURALIS CERE	29,7341655	1976	1976	1	1	1	1	PG
19	19/01/2017	NI542RH	PALMITOU	96,7099567	1550	1550	1	2	1	1	PG
20	19/01/2017	FG071DD	PALMITOU	62,2885251	1433	1433	1	2	1	1	PG
21	19/01/2017	WL965ZG	EURALIS CERE	89,1139603	2478	822	3	1	1	3	PGGG
22	19/01/2017	ZA417UC	EURALIS CERE	38,545944	2364	1181,5	2	1	1	2	PGG
23	19/01/2017	XY372PF	EURALIS CERE	17,4303275	2098	1049	2	1	1	2	PGG
24	19/01/2017	OP370SG	EURALIS CERE	42,440728	2109	1053	2	1	1	2	PGG
25	19/01/2017	CX815ZX	EURALIS CERE	51,2150784	1631	815,5	2	1	1	2	PGG
26	20/01/2017	XU879CT	LES CANARDS	74,4718548	1336	1336	1	2	1	1	PG
27	20/01/2017	KW832RP	EURALIS CERE	11,1450043	2040	2040	1	2	1	1	PG
28	20/01/2017	LF226VG	PALMITOU	122,181979	960	960	1	2	1	1	PG
29	20/01/2017	QD635VX	AGROPALM	123,172354	1000	1000	1	2	1	1	PG

DATE : date de la tournée ; IMM : immatriculation du véhicule ; OP : organisme de production gérant la tournée ; DISTANCE : distance parcourue par le camion entre le premier et le dernier élevage de la tournée ; CHARG : taille moyenne des chargements ; DECHARG : taille moyenne des déchargements ; TRAJETS : nombre de trajets ; DPT : nombre de départements visités ; PAG : nombre d'arrêts chez un éleveur PAG ; GAV : nombre d'arrêts chez un éleveur GAV ; TYPE\_TOUR : type de tournée

*Pour des raisons de confidentialité, les immatriculations des véhicules ont été générés aléatoirement.*



### 3) Les Bases AIN, TN et TNs

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	DATE	IMM	OP	TYPE_TOUR	SIRET_DEP	NOM_DEP	COMM_DEP	TYPE_DEP	DPT_DEP	LONG (WGS)	LAT (WGS)
2	07/01/2017	RF822PM	LES CANARDS	PGG	37039902580	ELEVEUR1	SAINT YAGUE	PAG	40	43,3643575	-1,22705943
3	07/01/2017	RF822PM	LES CANARDS	PGG	87861969955	ELEVEUR2	LUCQ DE BEAI	GAV	64	44,1959552	0,250073
4	07/01/2017	RF822PM	LES CANARDS	PGG	37039902580	ELEVEUR1	SAINT YAGUE	PAG	40	43,3643575	-1,22705943
5	09/01/2017	QF626XT	LES CANARDS	PG	09842587719	ELEVEUR4	CARCEN PON	PAG	40	44,3605633	-0,21528192
6	09/01/2017	UG175PV	LES CANARDS	PG	70113369853	ELEVEUR5	CARCEN PON	PAG	40	43,4129071	-0,60905911
7	12/01/2017	LK422EA	LES CANARDS	PG	55648777209	ELEVEUR6	SAINT GOR	PAG	40	44,4504959	-0,80163859
8	12/01/2017	UK735ZE	LES CANARDS	PGG	24231836835	ELEVEUR7	SAINT GOR	PAG	40	43,3552044	0,54194048
9	12/01/2017	UK735ZE	LES CANARDS	PGG	11826829794	ELEVEUR8	SAINT LON LE	GAV	40	44,8726198	-1,33588104
10	12/01/2017	UK735ZE	LES CANARDS	PGG	24231836835	ELEVEUR7	SAINT GOR	PAG	40	43,3552044	0,54194048
11	12/01/2017	XG925CC	LES CANARDS	PGG	81198412748	ELEVEUR10	SAINT GOR	PAG	40	44,9051037	0,30988186
12	12/01/2017	XG925CC	LES CANARDS	PGG	51630856939	ELEVEUR11	POUEYFERRE	GAV	65	44,4077598	-1,12959068
13	12/01/2017	XG925CC	LES CANARDS	PGG	81198412748	ELEVEUR10	SAINT GOR	PAG	40	44,9051037	0,30988186
14	13/01/2017	YI304ON	AVISERVICES	PG	82375992174	ELEVEUR13	TREMONS	PAG	47	44,173402	-1,96863049
15	17/01/2017	YI304ON	EURALIS CERE	PG	45663093967	ELEVEUR14	PUCH D AGEN	PAG	47	43,9676124	-0,15893057
16	17/01/2017	UO159RL	EURALIS CERE	PG	85642467793	ELEVEUR15	GRIGNOLS	PAG	33	44,5125201	-1,99255435
17	17/01/2017	VK059RQ	EURALIS CERE	PG	97025953070	ELEVEUR16	GRIGNOLS	PAG	33	43,87856	-1,14226605
18	17/01/2017	EY628ND	EURALIS CERE	PG	58002776152	ELEVEUR17	LANDIRAS	PAG	33	44,9359155	-0,79363189
19	17/01/2017	VX286PN	EURALIS CERE	PGG	94076968605	ELEVEUR18	PUCH D AGEN	PAG	47	44,1712324	-1,06613242
20	17/01/2017	VX286PN	LES CANARDS	PGG	79943280323	ELEVEUR19	CLAIRAC	GAV	47	44,486571	-1,66552774
21	17/01/2017	VX286PN	LES CANARDS	PGG	94076968605	ELEVEUR18	PUCH D AGEN	PAG	47	44,1712324	-1,06613242
22	17/01/2017	GB576NU	EURALIS CERE	PGG	94065354946	ELEVEUR21	GRIGNOLS	PAG	33	43,5258706	-0,44298898
23	17/01/2017	GB576NU	LES CANARDS	PGG	72859485274	ELEVEUR22	CLAIRAC	GAV	47	44,8240881	0,2759435
24	17/01/2017	GB576NU	LES CANARDS	PGG	94065354946	ELEVEUR21	GRIGNOLS	PAG	33	43,5258706	-0,44298898
25	19/01/2017	KX699PQ	AGROPALM	PG	47697040122	ELEVEUR24	LA DORNAC	PAG	24	44,9558464	-0,61044260
26	19/01/2017	HE511BB	EURALIS CERE	PG	92933758979	ELEVEUR25	POUILLON	PAG	40	44,7621566	-0,32017201
27	19/01/2017	HN410OR	EURALIS CERE	PG	21935910087	ELEVEUR26	IRISSARRY	PAG	64	44,6665296	0,79587305
28	19/01/2017	IW636CE	EURALIS CERE	PG	76890408994	ELEVEUR27	IRISSARRY	PAG	64	43,2984134	-0,87628641
29	19/01/2017	YL903XE	PALMITOU	PG	33403921193	ELEVEUR28	SAINT VINCENT	PAG	40	44,0174005	-0,02840958
30	21/01/2017	EQ416NZ	EURALIS CERE	PG	64510371785	ELEVEUR29	BEAUMARCHI	PAG	32	43,1149584	-0,84175244
31	21/01/2017	KP337CA	EURALIS CERE	PG	38654918180	ELEVEUR30	BEAUMARCHI	PAG	32	43,9316734	0,97386542
32	21/01/2017	MC442QY	EURALIS CERE	PG	21216118264	ELEVEUR31	LUPIAC	PAG	32	43,9808883	0,26669702
33	21/01/2017	SF897SY	EURALIS CERE	PG	50212144598	ELEVEUR32	BEAUMARCHI	PAG	32	43,9594006	-1,76018998
34	21/01/2017	QO758YP	EURALIS CERE	PG	05667847355	ELEVEUR33	FUSTEROUAU	PAG	32	44,7670159	0,36506261
35	23/01/2017	EN311YQ	AGROPALM	PG	22394877962	ELEVEUR34	MAUROUX	PAG	46	43,5387133	-1,77756048
36	23/01/2017	QE128FY	EURALIS CERE	PG	82258427763	ELEVEUR35	BASTANES	PAG	64	43,5241733	0,01600756
37	23/01/2017	XP217KF	EURALIS CERE	PG	38157282951	ELEVEUR36	LAY LAMIDOL	PAG	64	43,3097347	-1,53784812

L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
LONG (L93)	LAT (L93)	SIRET_ARR	NOM_ARR	COMM_ARR	TYPE_ARR	DPT_ARR	LONG (WGS)	LAT (WGS)	LONG (L93)	LAT (L93)	ANIMAUX
384319,904	629652,334	87861969955	ELEVEUR2	LUCQ DE BEAI	GAV	64	44,1959552	0,250073	460215,602	628174,444	740
460215,602	628174,444	01666046969	ELEVEUR3	VIDOUZE	GAV	65	43,9913603	-0,49733839	357093,025	631463,642	
384319,904	629652,334	01666046969	ELEVEUR3	VIDOUZE	GAV	65	43,9913603	-0,49733839	357093,025	631463,642	988
440428,036	624120,516	06256215739	ELEVEUR40	PUYOO	GAV	64	44,9305862	0,72887699	419692,951	633760,094	546
371984,158	632698,243	67102127350	ELEVEUR41	PUYOO	GAV	64	44,6666353	0,94106625	408673,781	630940,692	969
470256,625	634272,728	74180808156	ELEVEUR42	SAVIGNAC	GAV	33	43,6648589	0,55948389	353861,215	629521,555	1500
381199,693	637401,463	11826829794	ELEVEUR8	SAINT LON LE	GAV	40	44,8726198	-1,33588104	519894,683	636013,016	1536
519894,683	636013,016	47217567444	ELEVEUR9	MONTAUT	GAV	64	44,4465398	-0,44699979	430196,349	623717,405	
381199,693	637401,463	47217567444	ELEVEUR9	MONTAUT	GAV	64	44,4465398	-0,44699979	430196,349	623717,405	876
417796,456	623539,112	51630856939	ELEVEUR11	POUEYFERRE	GAV	65	44,4077598	-1,12959068	380243,391	629582,621	1000
380243,391	629582,621	67891075770	ELEVEUR12	MONTAUT	GAV	64	43,0516941	-0,42857512	385654,847	632697,859	
417796,456	623539,112	67891075770	ELEVEUR12	MONTAUT	GAV	64	43,0516941	-0,42857512	385654,847	632697,859	800
481196,472	626398,495	74047848917	ELEVEUR49	CAZIDEROQU	GAV	47	43,7267375	-0,4486478	479770,885	630654,516	1176
423759,337	628020,96	52333332833	ELEVEUR50	BOURLENS	GAV	47	44,6053874	0,49805742	519193,966	634430,954	936
414843,511	629252,504	17810058463	ELEVEUR51	BERAT	GAV	31	43,8174754	-0,94227374	512602,777	627058,151	1418
519124,24	628125,76	60034142540	ELEVEUR52	LECUSSAN	GAV	31	44,8072834	0,44941606	469398,904	627137,329	1231
517870,709	623332,439	89964793026	ELEVEUR53	LECUSSAN	GAV	31	43,0865297	0,37209771	372727,627	633927,528	769
474195,93	637712,447	79943280323	ELEVEUR19	CLAIRAC	GAV	47	44,486571	-1,66552774	393693,214	636178,986	554
393693,214	636178,986	34704386600	ELEVEUR20	ANDIRAN	GAV	47	44,7038981	-0,27622164	417844,393	628171,319	
474195,93	637712,447	34704386600	ELEVEUR20	ANDIRAN	GAV	47	44,7038981	-0,27622164	417844,393	628171,319	960
498542,597	636837,376	72859485274	ELEVEUR22	CLAIRAC	GAV	47	44,8240881	0,2759435	458955,706	624957,408	286
458955,706	624957,408	92057171884	ELEVEUR23	ESTADENS	GAV	31	44,1934066	-1,71154432	516064,289	631154,625	
498542,597	636837,376	92057171884	ELEVEUR23	ESTADENS	GAV	31	44,1934066	-1,71154432	516064,289	631154,625	960
353732,966	629920,42	41066651750	ELEVEUR60	LAVALADE	GAV	24	44,5536219	0,40255558	357882,304	634250,699	2673
453501,935	630619,543	80881309823	ELEVEUR61	BIAUDOS	GAV	40	44,8805662	0,40712857	388668,359	625635,378	1620
441634,036	625689,649	84414164110	ELEVEUR62	ESPIUTE	GAV	64	43,6495511	-0,91633139	487058,788	625595,009	1000
447474,381	636966,379	70387124548	ELEVEUR63	LICHOS	GAV	64	44,9805454	-0,01124662	439885,36	637590,673	1976
459585,957	624043,754	89770440414	ELEVEUR64	ASSON	GAV	64	43,8266939	-1,80321766	495176,641	631585,646	1550
394824,402	626567,302	85567698834	ELEVEUR65	LARROQUE SI	GAV	32	44,1467752	-1,03881425	359235,406	636694,662	1000
371920,118	631340,967	09517059721	ELEVEUR66	AURIEBAT	GAV	65	44,8515836	-1,75865348	462278,316	631966,623	2000
375411,171	624625,931	41610988524	ELEVEUR67	BOULOGNE SI	GAV	31	44,6814597	-1,16501301	378832,332	635112,221	692
425896,688	636896,257	88170197200	ELEVEUR68	BEAUMARCHI	GAV	32	43,4562488	0,18490084	455272,941	624482,804	960
356362,964	626050,895	80988266583	ELEVEUR69	RISCLE	GAV	32	43,7783735	-0,37687374	435134,659	626446,291	2600
418864,375	631909,309	85932930148	ELEVEUR70	MONLONG	GAV	65	44,002525	0,76731746	406946,426	634955,823	2000
528214,258	633019,037	87227444809	ELEVEUR71	LYS	GAV	64	43,2428012	-0,31943119	444251,596	626925,228	2848
428376,007	633529,707	32559919241	ELEVEUR72	ATHOS ASPIS	GAV	64	43,6936073	-1,55951518	397895,114	624310,16	1024

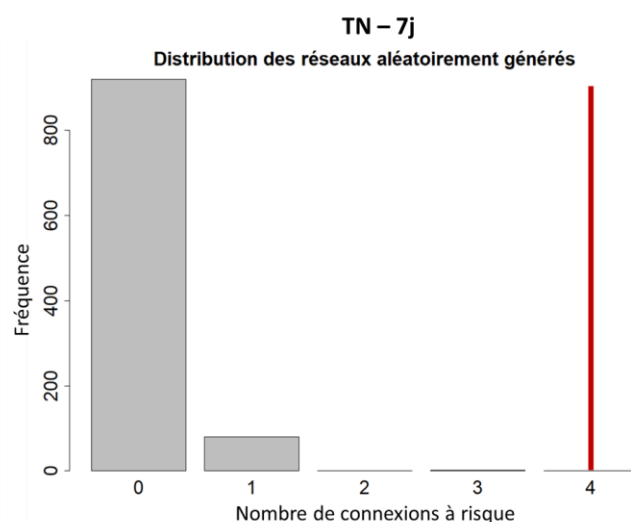
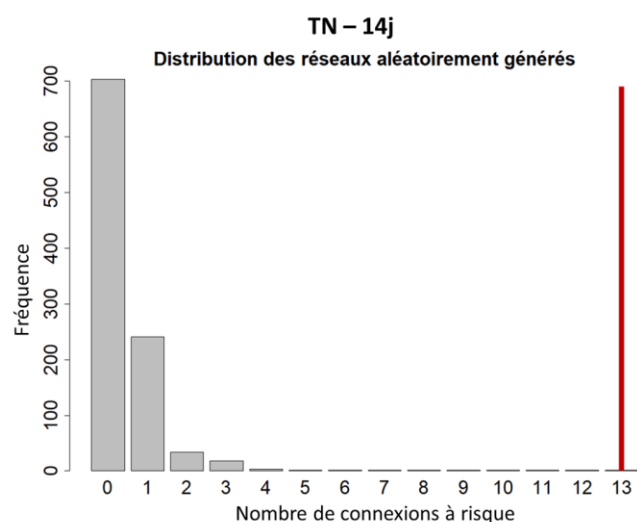
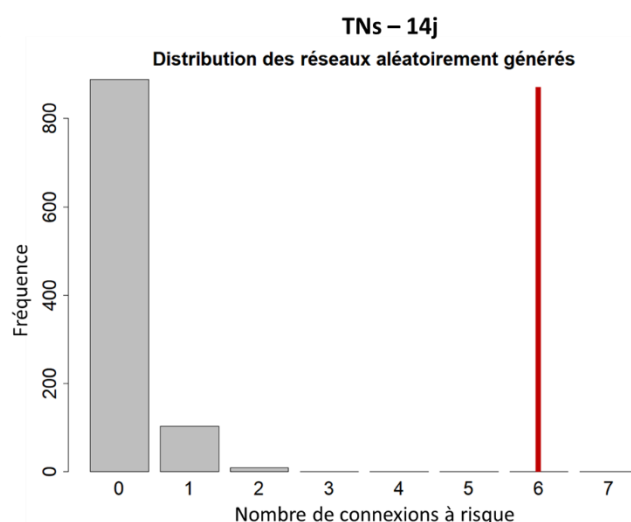
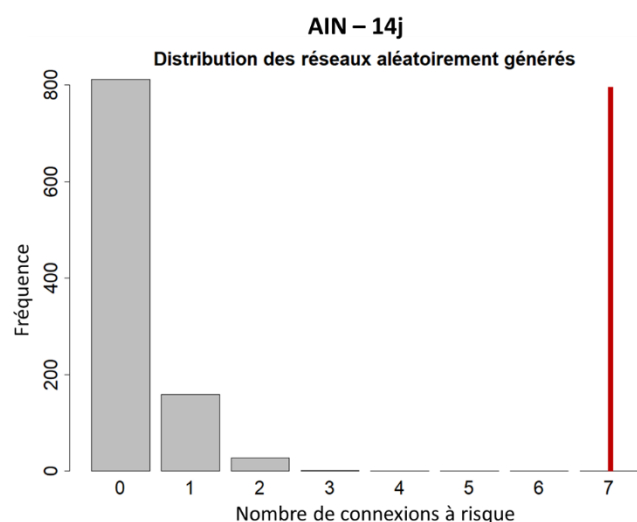
DATE : date de la connexion ; IMM : immatriculation du véhicule ; OP : organisme de production gérant la tournée ; TYPE\_TOUR : type de tournée ; \_DEP : tous les paramètres concernant l'élevage en amont de la connexion ; \_ARR : tous les paramètres concernant l'élevage en aval de la connexion ; NOM\_ : nom de l'élevage ; SIRET\_ : numéro de SIRET de l'élevage ; TYPE\_ : type d'activité pratiqué par l'élevage (PAG, GAV ou mixte) ; OP : organisme de production affilié à l'élevage ; COMM\_ : commune d'enregistrement de l'élevage ; DPT\_ : département où se situe l'élevage ; LONG : longitude ; LAT : latitude ; WGS : World Geodetic System ; L93 : Lambert 93 ; ANIMAUX : nombres d'animaux transférés, si la connexion est un transfert d'animaux

*Pour des raisons de confidentialité, les noms d'éleveurs ont été remplacé par un terme générique (ELEVEURn), et les numéros de SIRET, coordonnées géographiques et immatriculations des véhicules ont été générés aléatoirement.*

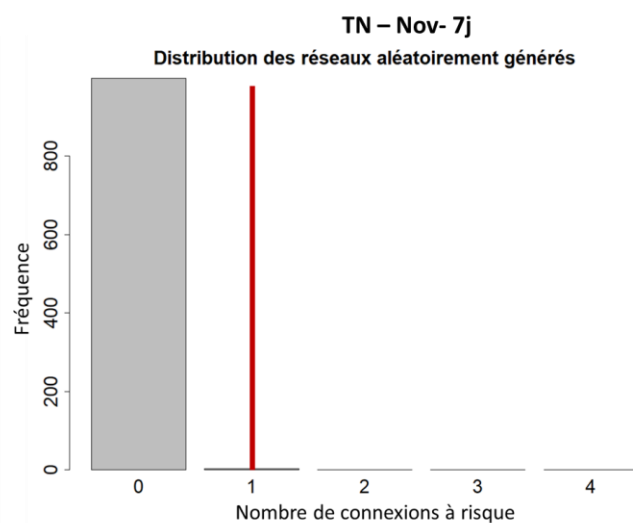
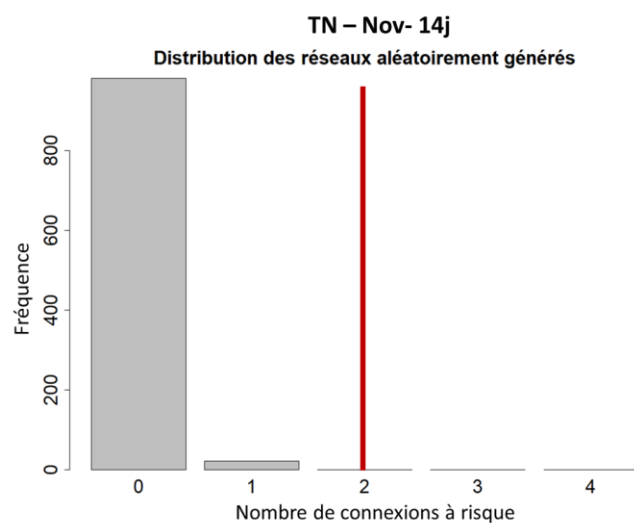
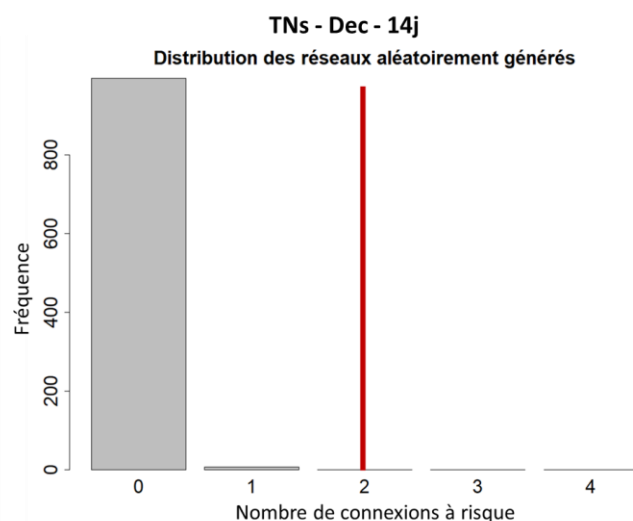
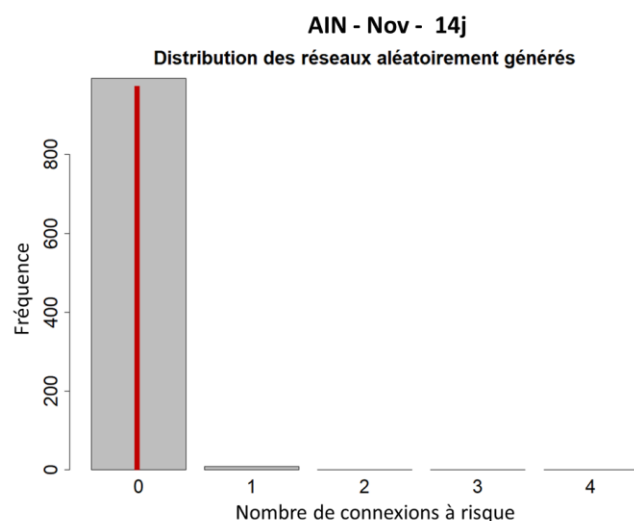
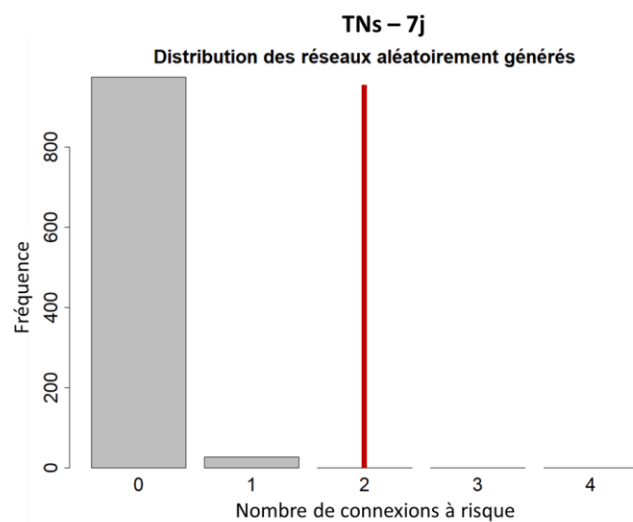
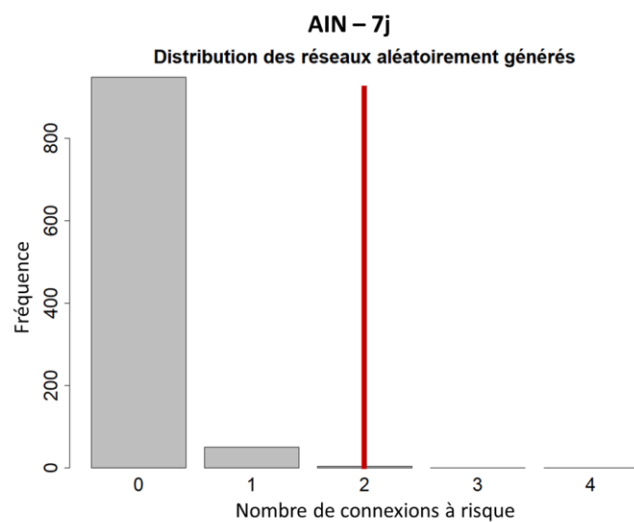
*Cette base regroupe l'ensemble des connexions entre élevages au sein d'une tournée, et représente donc le TN. L'AIN est obtenu en ne gardant que les connexions comportant un transfert d'animaux (valeur non nulle dans la colonne ANIMAUX) et le TNs est obtenu en ne gardant que les connexions sans transfert d'animaux (valeur nulle dans la colonne ANIMAUX).*

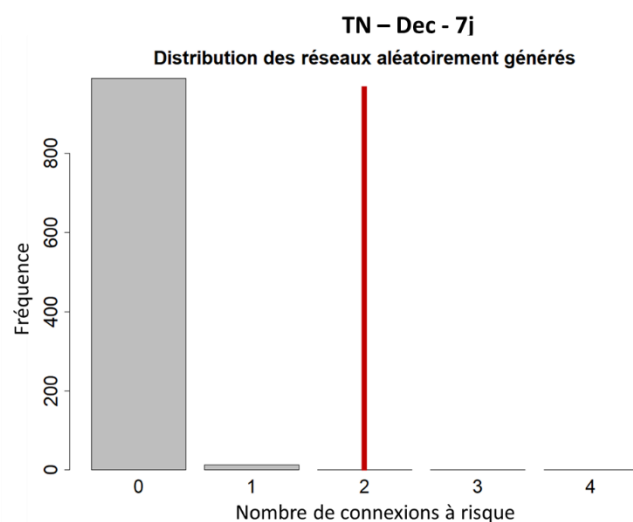
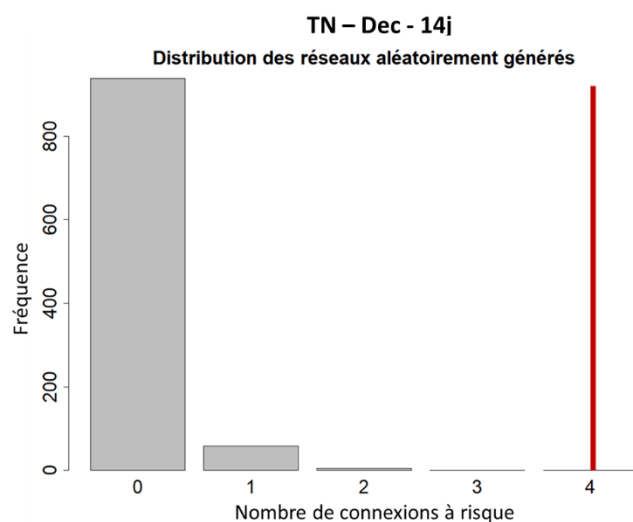
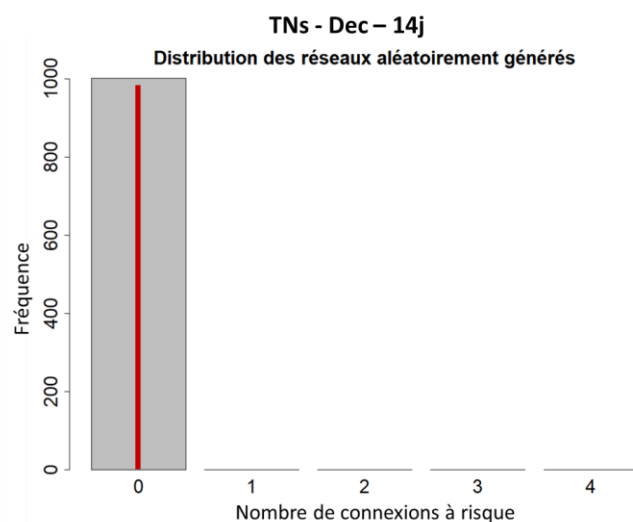
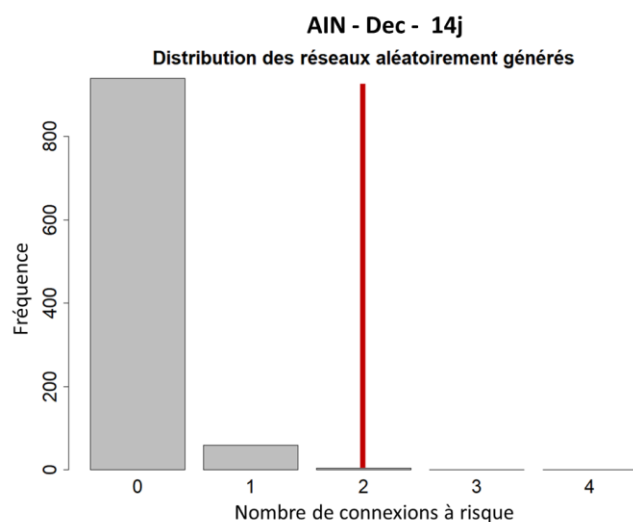
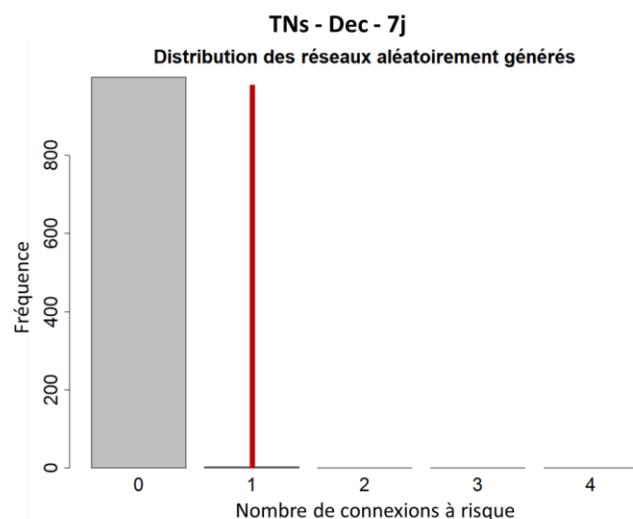
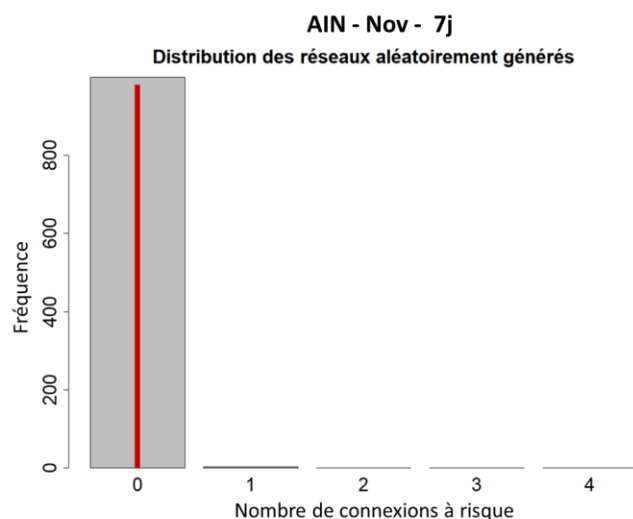
*Les tournées sont composées de plusieurs connexions, et peuvent être visualisés par les blocs de couleurs dans l'exemple.*

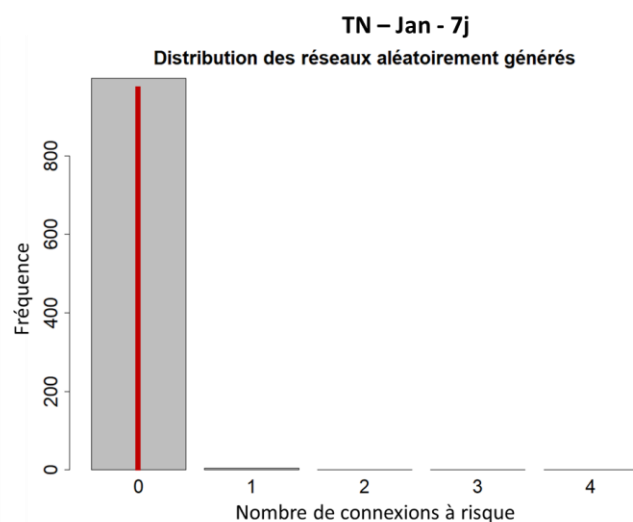
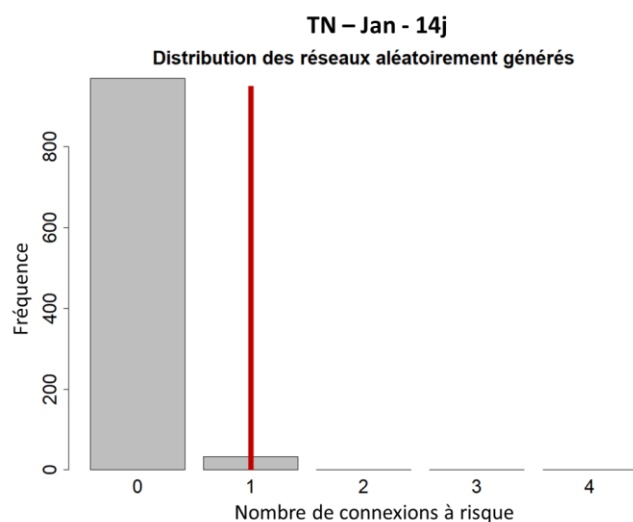
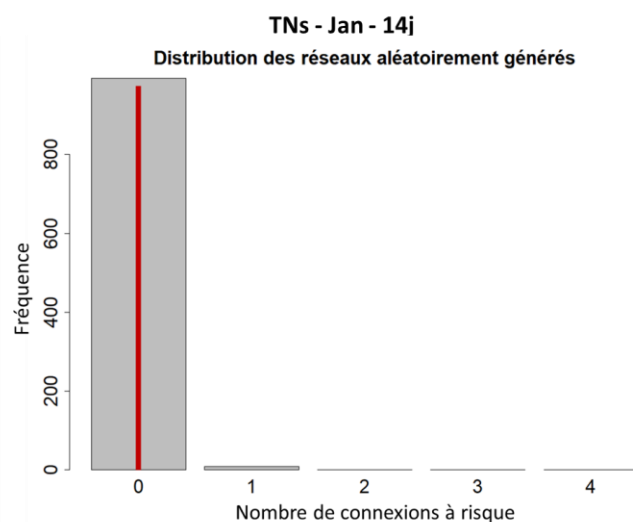
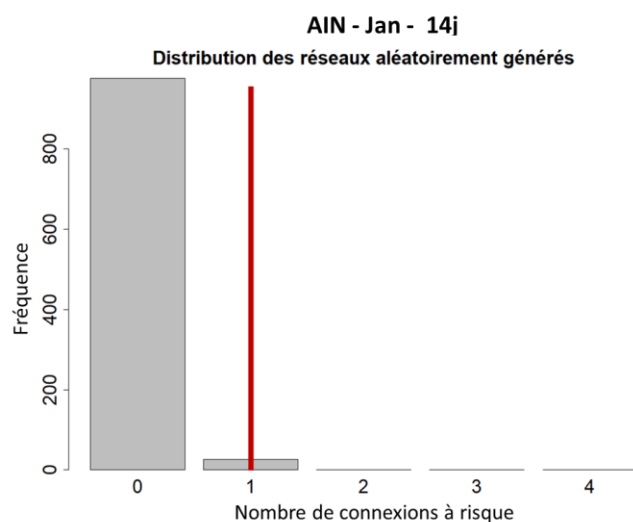
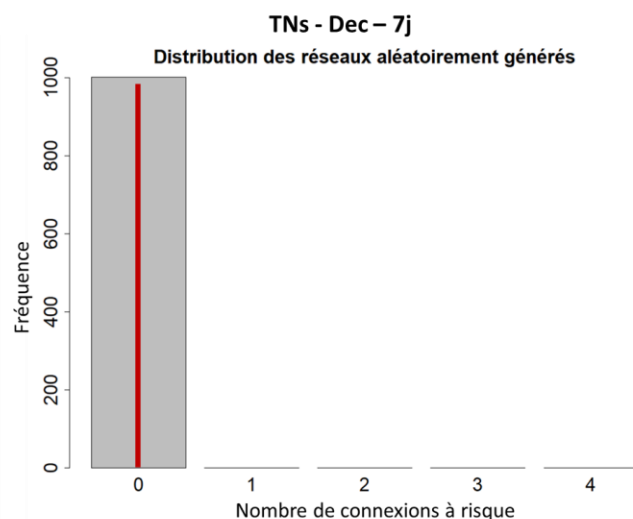
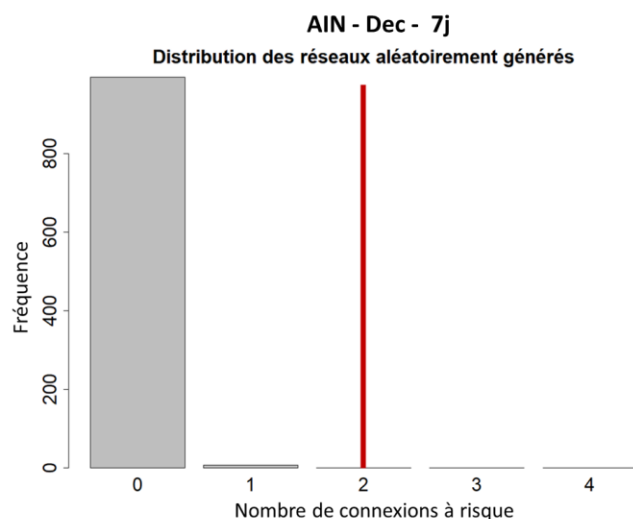
**Annexe 2 : Distribution du nombre de connexions à risque pour les réseaux aléatoirement générés, pour l'ensemble des variables testées.** *Marqueur rouge : nombre de connexions à risque pour les réseaux réels. Variables testées : AIN (Animal Introduction Network), TNs (Transit Network spécifique), TN (Transit Network) – 7 ou 14 jours d'intervalle entre la date connexion et les dates de suspicion de foyer dans les élevages – toute la période épidémiologique ou chaque mois (novembre 2016, décembre 2016, janvier 2017, février 2017, mars 2017).*

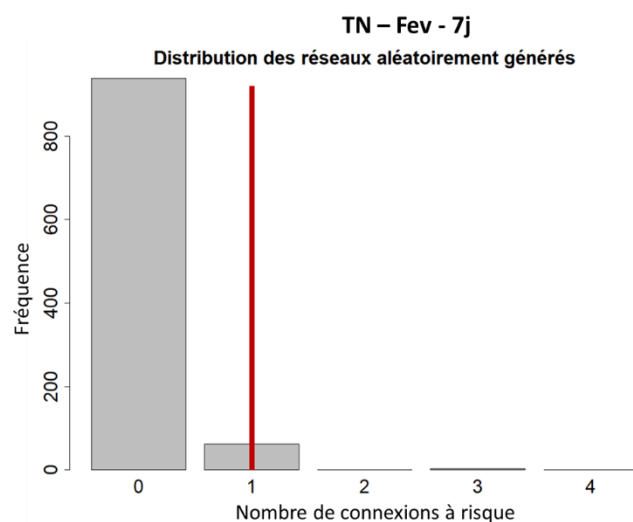
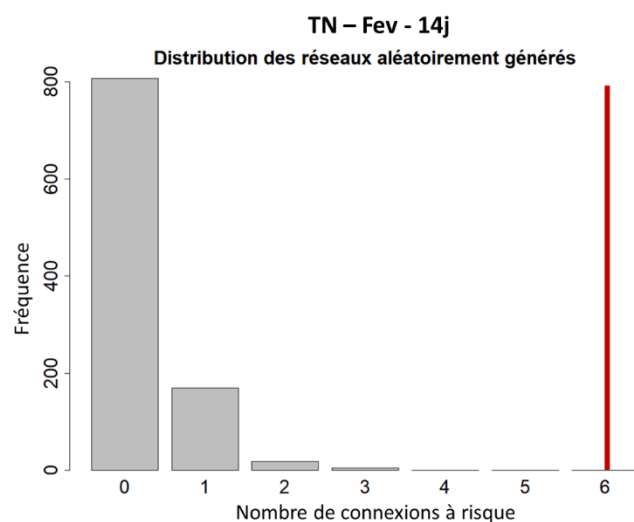
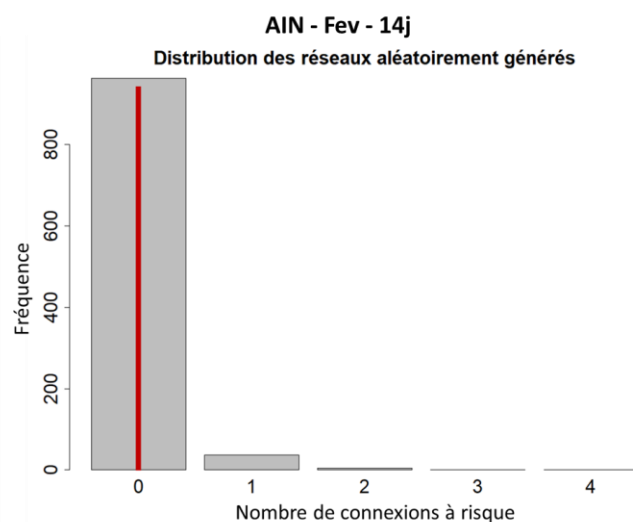
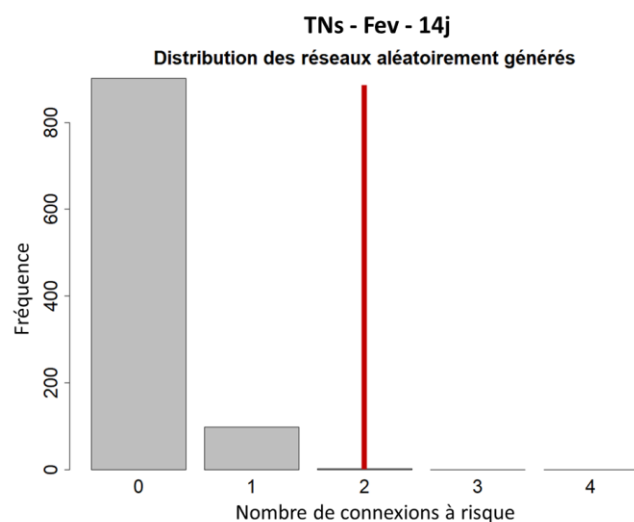
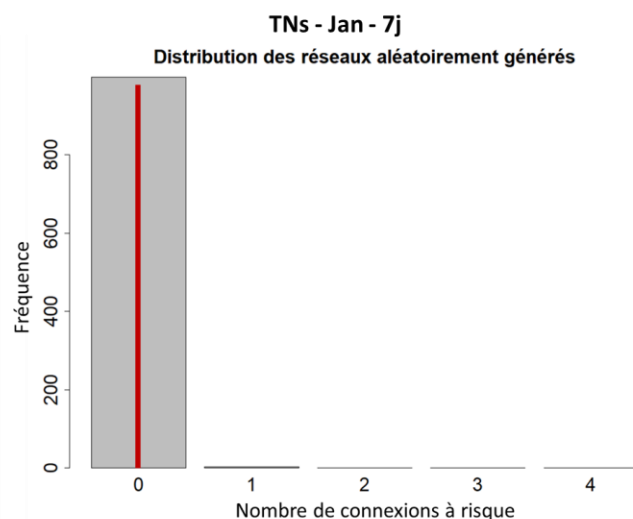
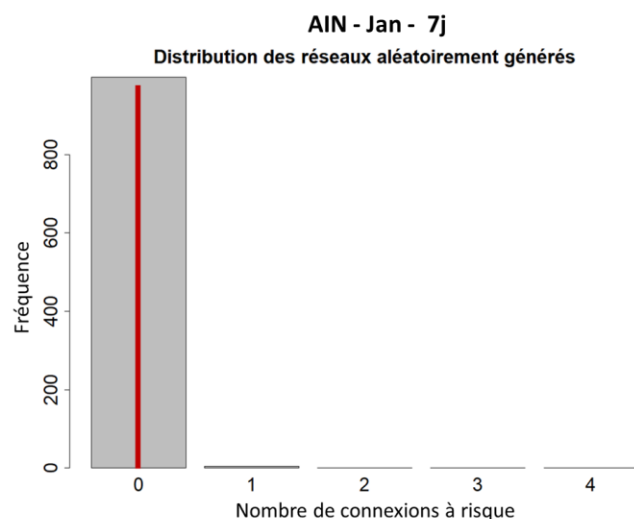




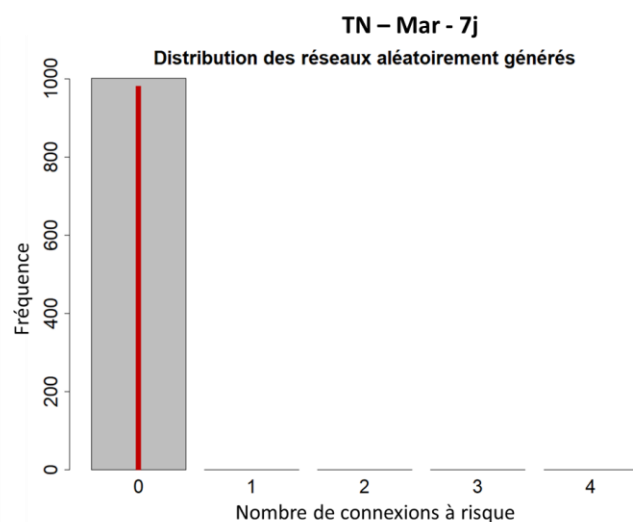
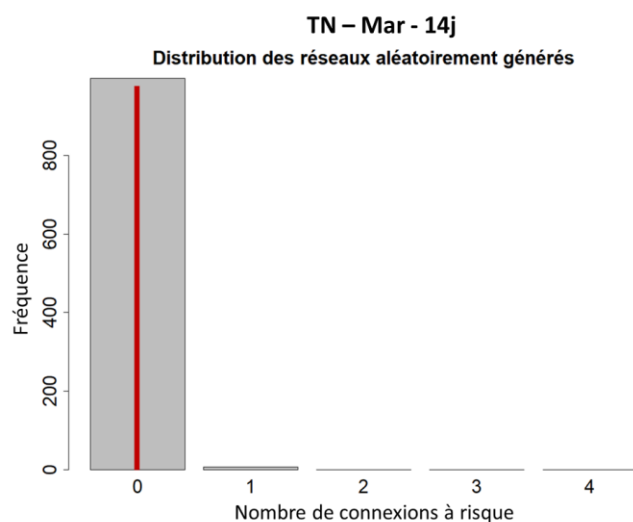
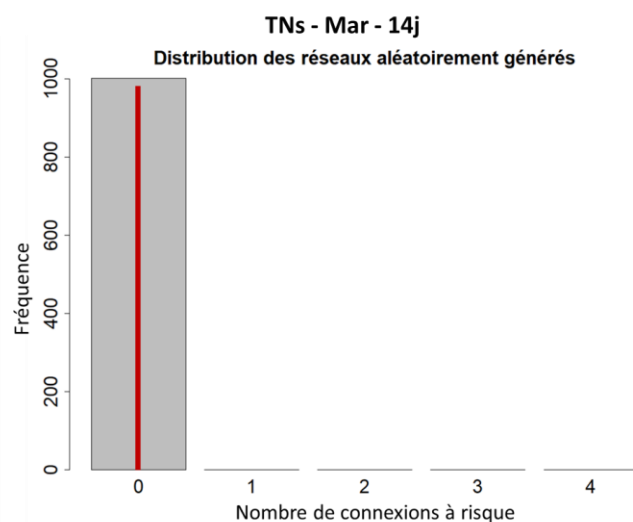
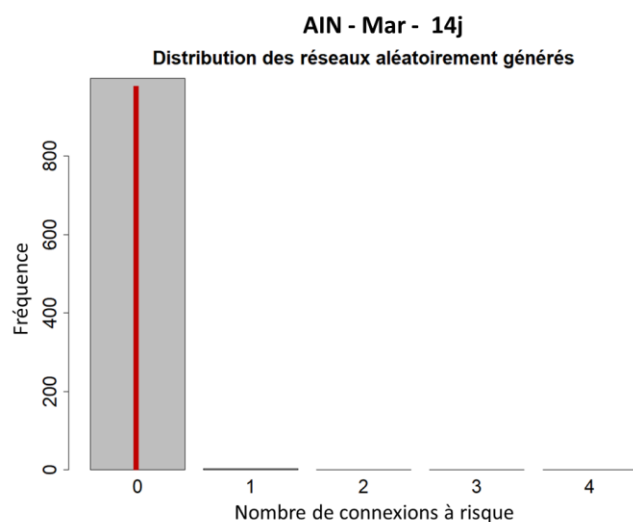
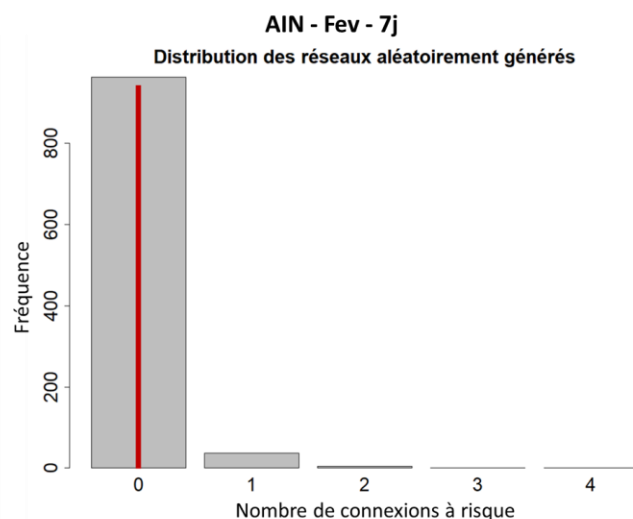
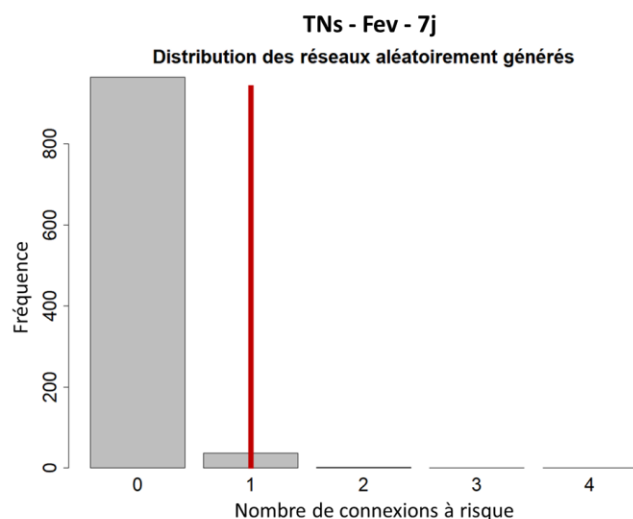


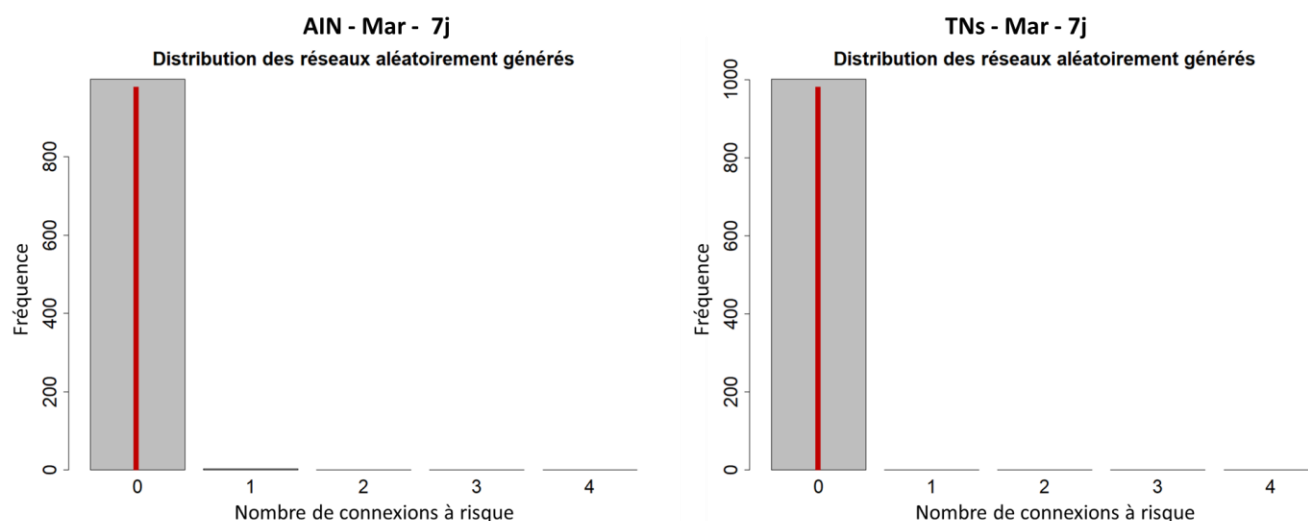












### **Annexe – 3 : Comparaison du nombre de transferts d’animaux recensés chaque mois entre les bases transporteurs et le CIFOG**

Pour évaluer si nos données, issues de deux compagnies de transport, étaient représentatives de la situation dans le Sud-Ouest, nous avons comparé notre jeu de données (à partir de la base AIN) avec le jeu de données fournies par le CIFOG (décrivant l’ensemble des transferts d’animaux ayant eu lieu sur la période d’étude).

Le nombre total de transfert d’animaux recensés chaque mois dans chaque jeu de donnée ont ainsi été calculés, de façon globale puis par département et par organisme de production. La période d’étude a été réduite à la période d’enregistrement commune aux deux compagnies, soit du 01/01/2017 au 31/12/2018.

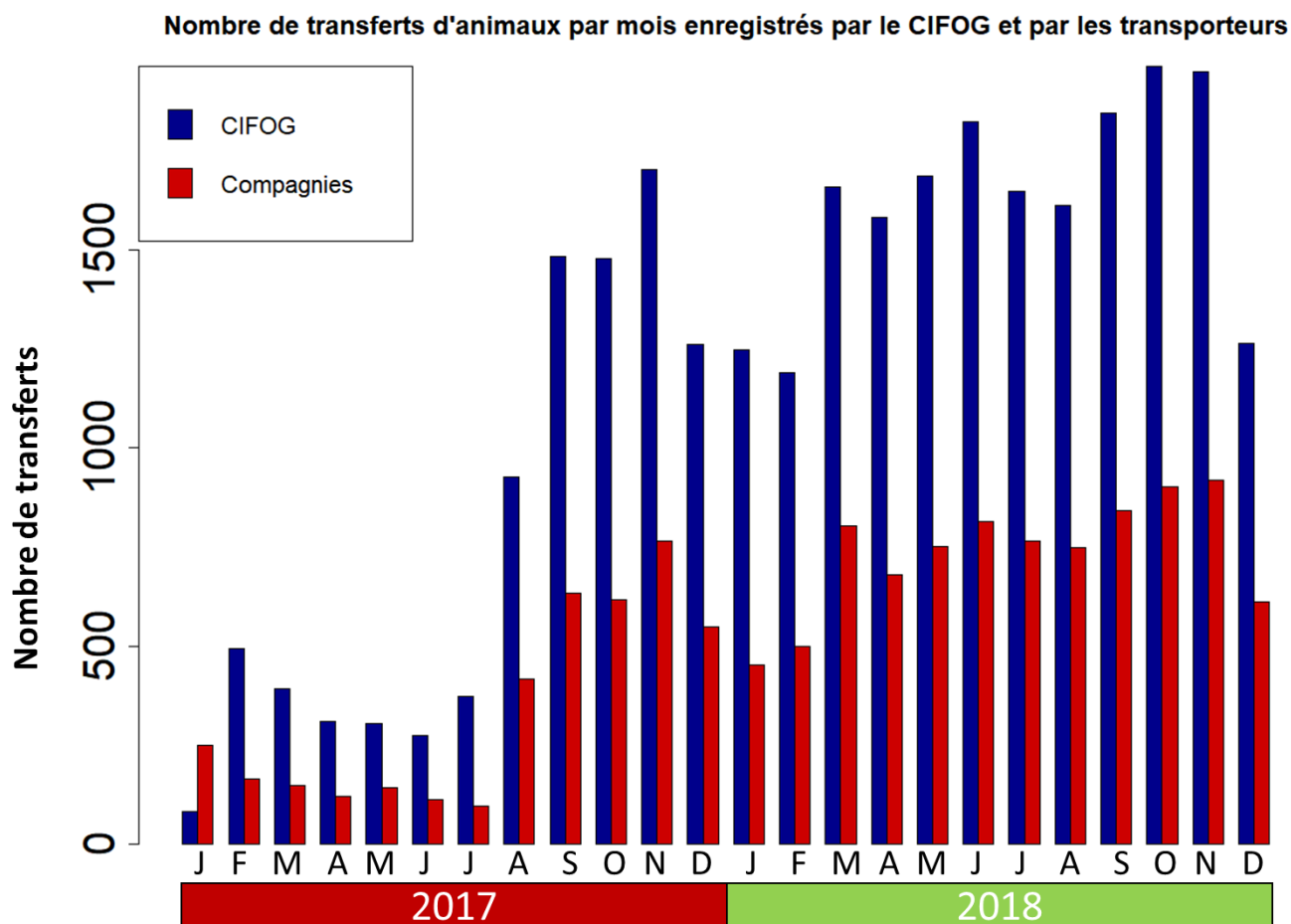
En comparant nos données avec les bases du CIFOG, sur le nombre total de transferts d’animaux recensés chaque mois, il apparaît que nos données, enregistrées par les deux compagnies de transport, ne couvrent qu’une partie des données enregistrées par le CIFOG sur la même période, et ce quel que soit le mois étudié (en moyenne seules 45 % des introductions d’animaux figurent à la fois dans la base du CIFOG et les bases transporteur).

Pour évaluer l’origine de ce manque de données, nous avons comparé les mêmes indices en triant par organismes de production et départements.

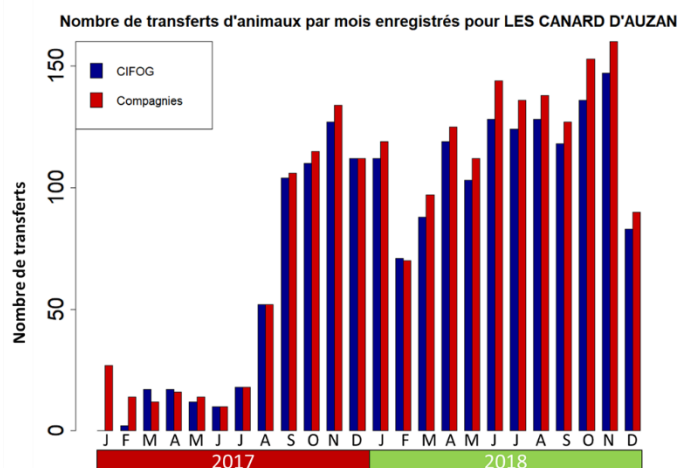
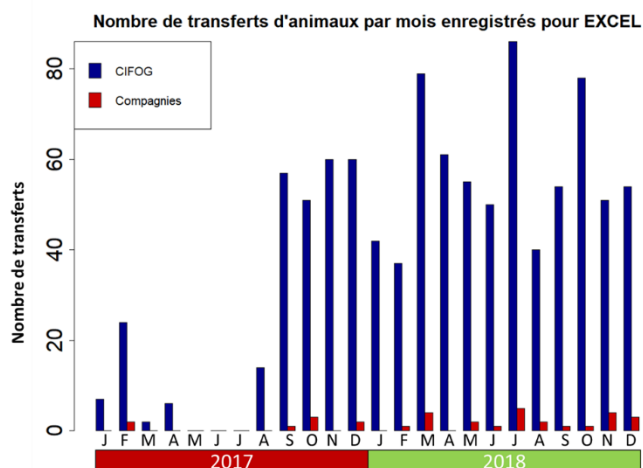
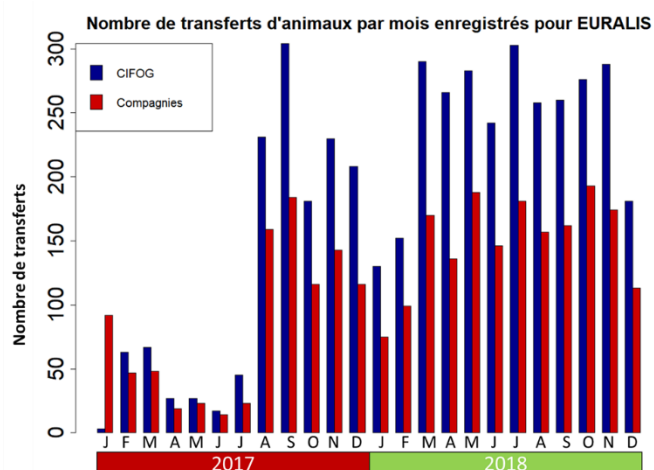
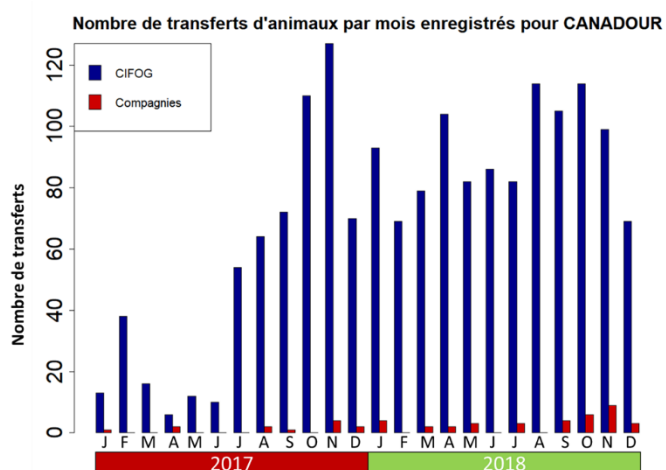
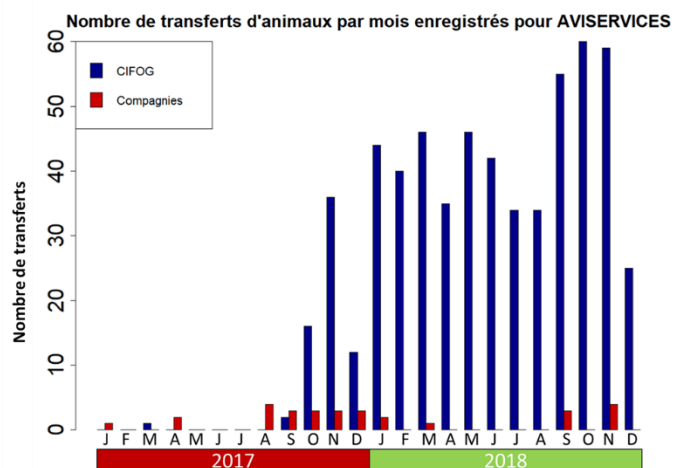
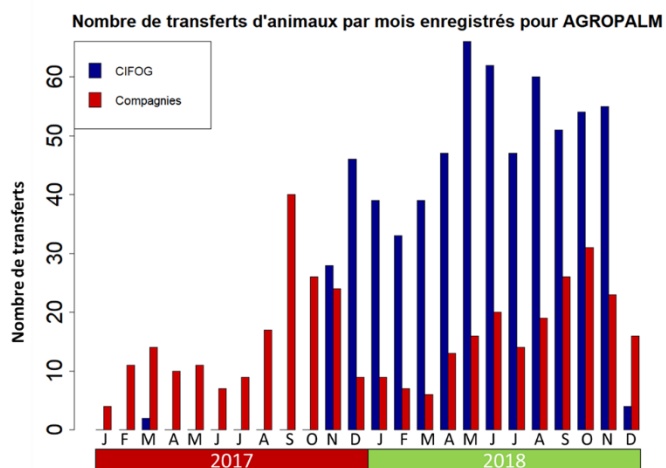
Au vu de ces analyses par facteur, il a été constaté que nos données ne sont complètes, dans le sens où on retrouve en moyenne les mêmes nombres de transferts d’animaux chaque mois pour les deux jeux de données, que pour certains organismes de production (Les canards d’auzan,

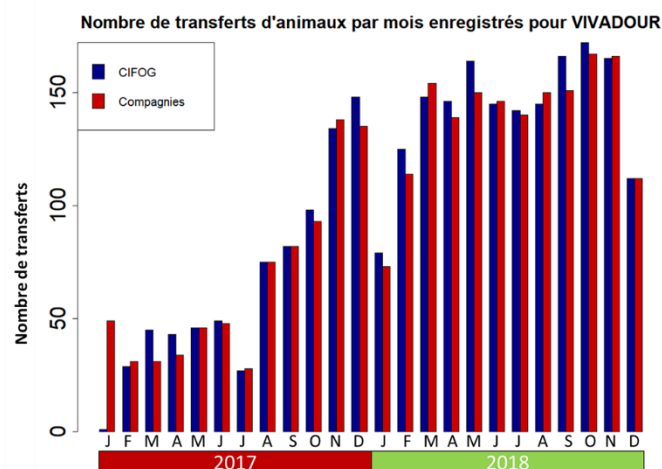
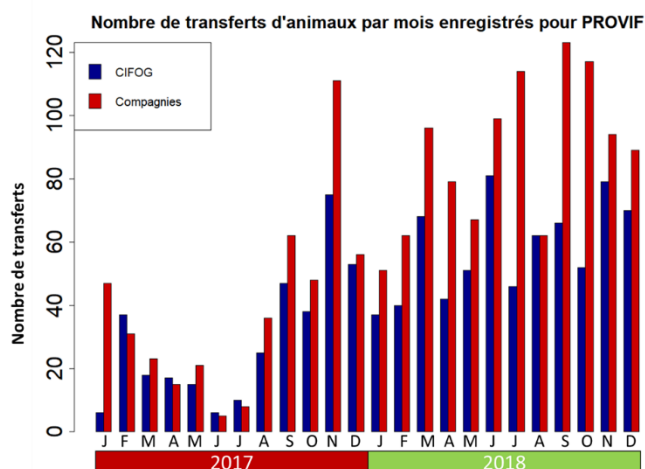
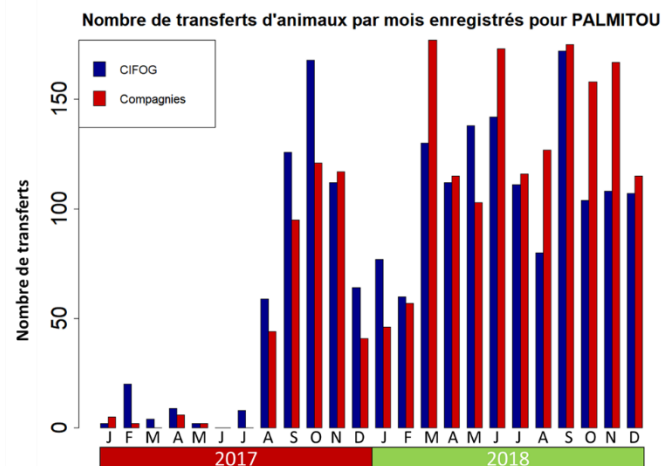
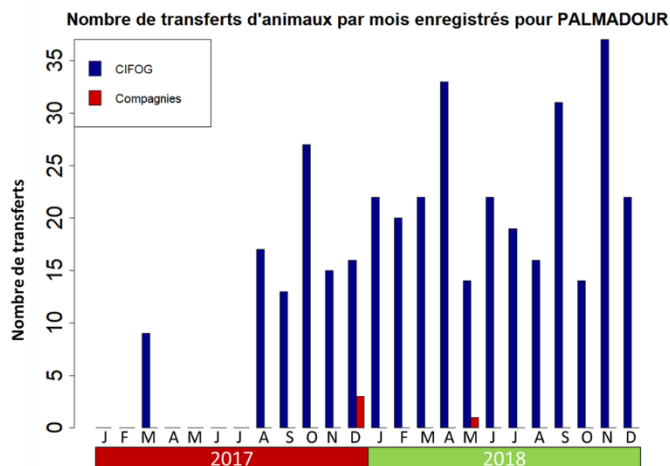
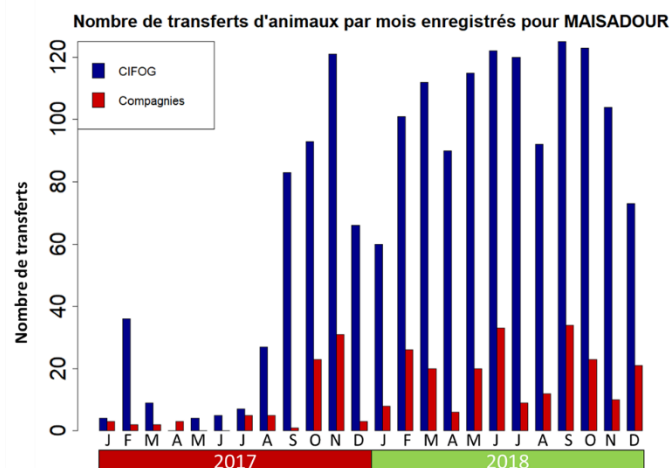
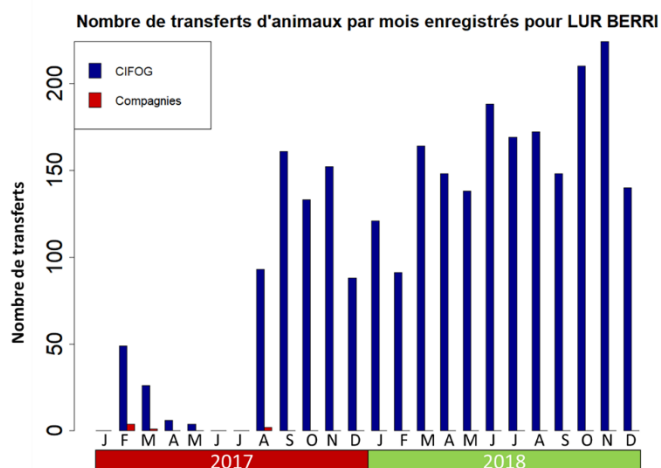
Palmitou, Provif et Vivadour) et certains départements uniquement (Gers, Hautes-Pyrénées, Haute-Garonne). A contrario, il existe certains organismes de production et certains départements pour lesquels on ne retrouve quasiment aucune donnée dans les bases transporteurs (exemple : Lur Berri pour les organismes de production, la Dordogne pour les départements).

### 1) Comparaison globale

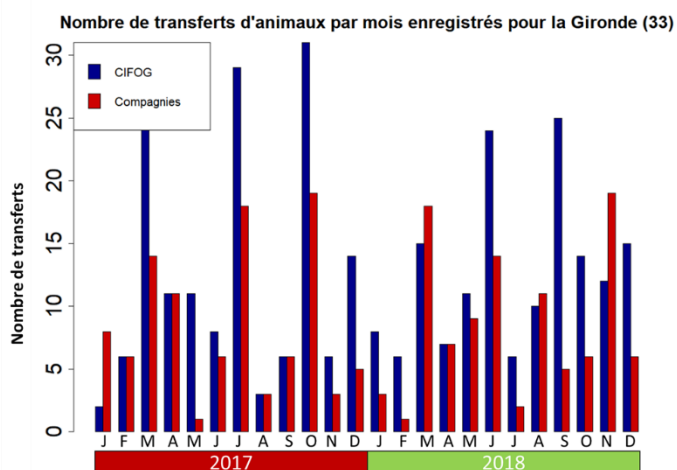
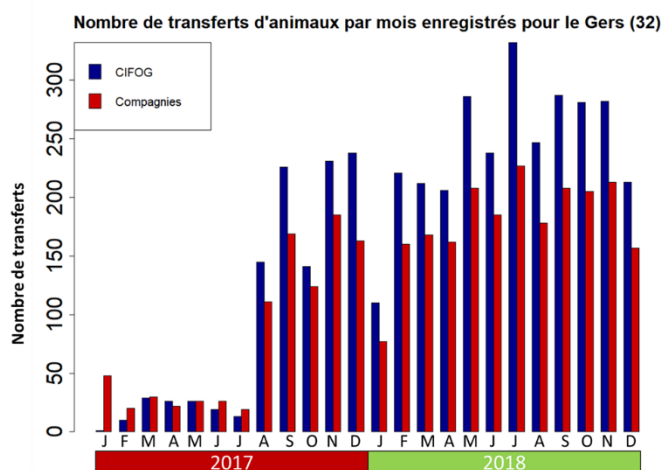
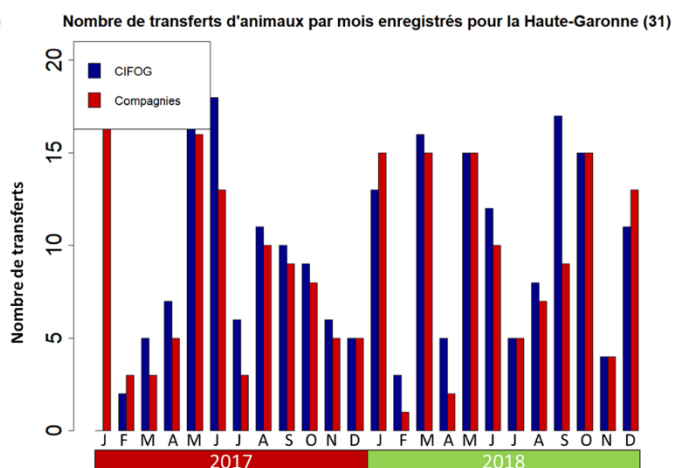
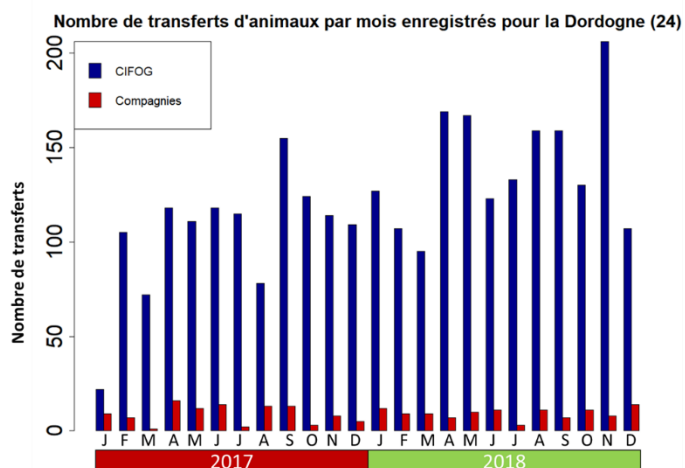


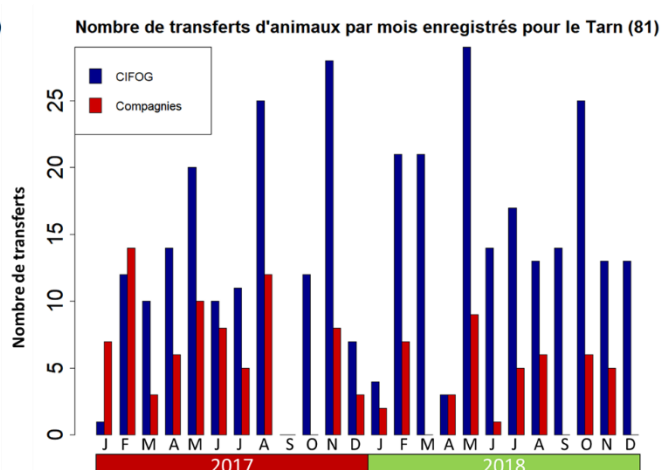
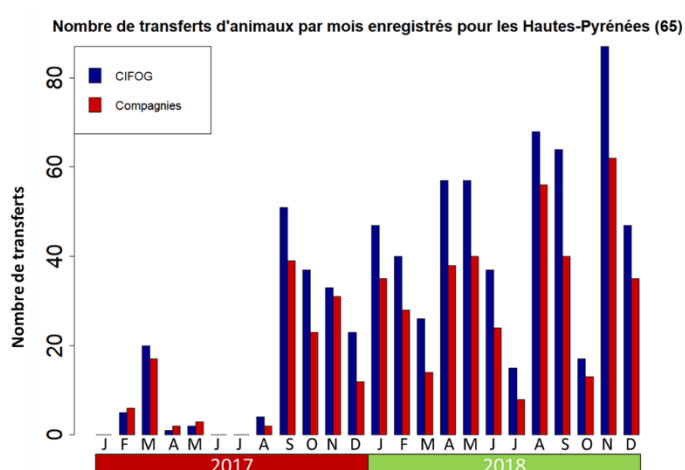
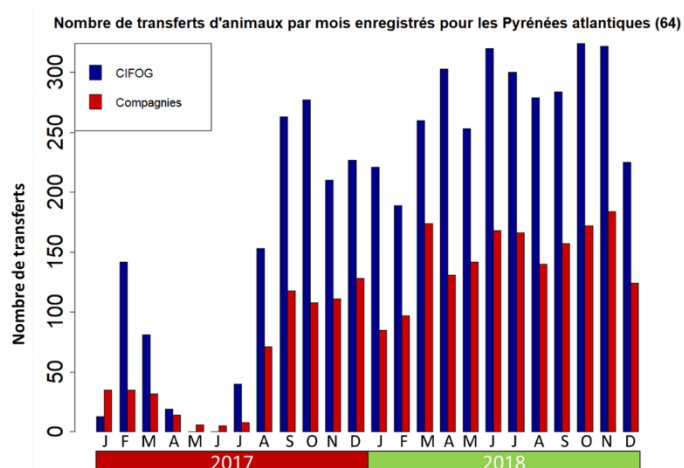
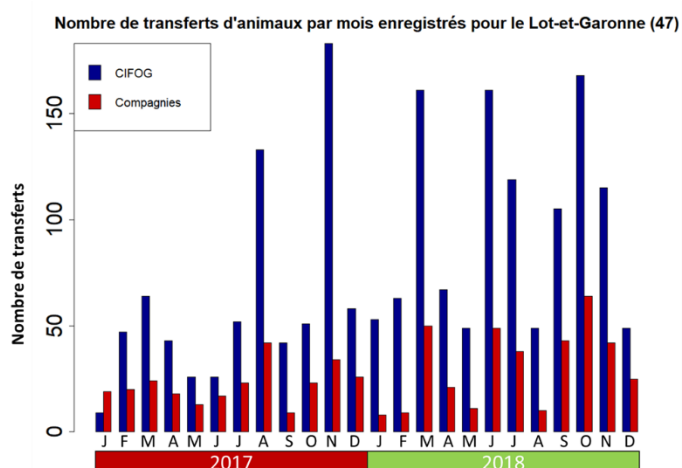
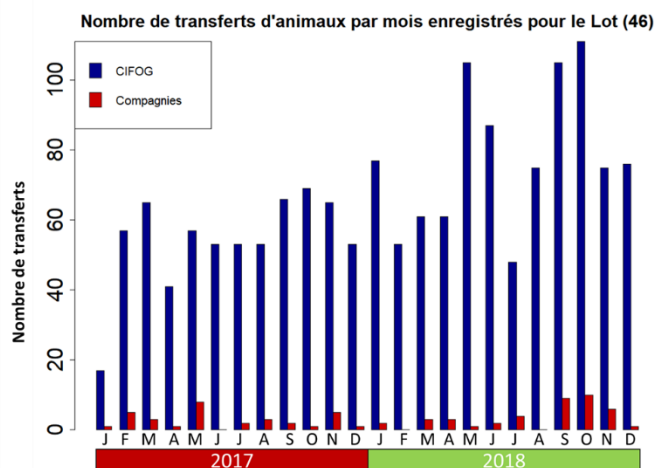
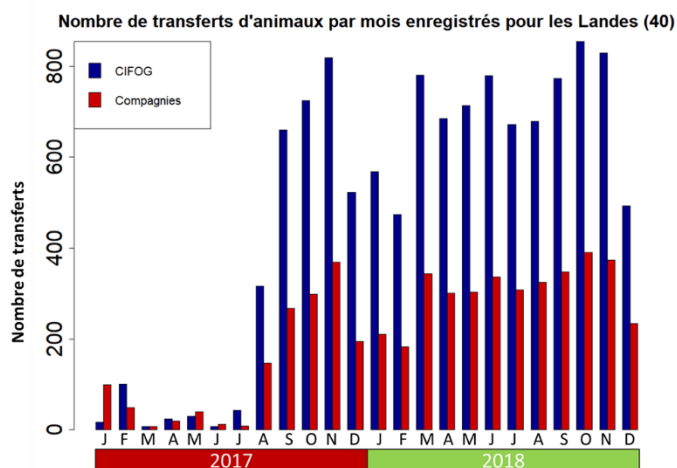
### 2) Comparaison par organismes de production





### 3) Comparaison par départements





## **SICARD GABRIEL**

Étude du réseau de transport de palmipèdes à foie gras dans le Sud-Ouest et du rôle joué par les mouvements de véhicules de transport dans la dissémination du virus de l'influenza aviaire, *dans le cadre de l'épizootie d'IAHP 2016-2017*

### **Résumé :**

Ce travail est une étude de l'impact de l'épizootie d'IAHP 2016-2017 sur le réseau de transport de palmipèdes à foie gras, et du rôle potentiel joué par les véhicules de transport dans la propagation du virus. Nous avons constaté que le réseau de transport a été fortement perturbé pendant l'épizootie, avec une activité de plus en plus réduite, due aux mesures restrictives mises en place par le gouvernement. Nous avons constaté que les mouvements de véhicules pouvaient avoir joué un rôle minime mais crucial dans la dissémination du virus, que ce soit par le portage passif de particules virales ou par le transfert d'animaux infectés d'un élevage à un autre. Ainsi, une attention particulière à la bonne mise en place des mesures de biosécurité en élevage, et des études supplémentaires sur le sujet sont recommandées.

### **Mots-clés :**

Epizootie, Influenza aviaire, Mouvements de véhicules, Palmipèdes à foie gras, Réseau de transport, Voies de dissémination

### **Summary :**

This work is a study of the effect of 2016-2017 IAHP epizootic on the transport of fattening ducks network, and of the potential role played by transport vehicles on virus spreading. We found that transport network was strongly disrupted during the epizootic, with an constantly reducing activity, due to the restrictives measures applied by the government. We found that vehicles movements could have play a minimal but crucial role in virus spreading, either by passive carrying of fomites, either by introducing infected animals from holdings to another. Thus, a particular attention for applying correctly biosecurity measures in holdings, and further studies about the subject are recommended.

### **Keywords :**

Avian influenza, Epizootic, Fattening ducks, Transmission route, Transport Network, Trucks movements